

MAYCON RICARDO SEDREZ

FORMA FRACTAL NO ENSINO DE PROJETO  
ARQUITETÔNICO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação  
em Arquitetura e Urbanismo da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina como requisito parcial  
à obtenção do título de Mestre  
em Arquitetura e Urbanismo.

ORIENTADORA: ALICE THERESINHA CYBIS PEREIRA, PHD.

FLORIANÓPOLIS  
2009

Ficha elaborada pela  
Biblioteca Universitária da FURB

---

S449f Sedrez, Maycon Ricardo.  
Forma fractal no ensino de projeto arquitetônico assistido por  
computador / Maycon Ricardo Sedrez – 2009.  
158 f.: il.  
Orientadora: Alice Theresinha Cybis Pereira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina,  
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.  
Bibliografia: f. 137-157.

etc. 1. Projeto arquitetônico. 2. Arquitetura – Composição, proporção,  
3. Ensino auxiliado por computador. I. Pereira, Alice T. Cybis  
(Alice Theresinha Cybis), 1959-. II. Universidade Federal de  
Santa Catarina.  
III. Título.

CDD 721

---

MAYCON RICARDO SEDREZ

FORMA FRACTAL NO ENSINO DE PROJETO  
ARQUITETÔNICO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação  
em Arquitetura e Urbanismo da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina como requisito parcial  
à obtenção do título de Mestre  
em Arquitetura e Urbanismo.

---

Carolina Palermo – Coordenadora do Programa  
Aprovado pela Banca Examinadora em 30 de Abril de 2009.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Alice T. Cybis Pereira, PhD – UFSC – Orientadora

---

Sonia Afonso – UFSC

---

Tarcísio Vanzin – UFSC

---

Benamy Turkienicz – UFRGS

---

Tânia Baier – FURB

*Dedico este trabalho aos apaixonados pela  
complexidade da arquitetura contemporânea.*

*Agradeço a todos que contribuíram para a formulação desta pesquisa, especialmente pela orientação atenciosa da professora Alice T. Cybis Pereira.*

*Agradeço à Universidade Regional de Blumenau por ter possibilitado minha participação no mestrado e à Universidade Federal de Santa Catarina por ter me proporcionado esta experiência.*

*“Several times  
I explore your infinite forms.  
Parallel.  
On your round shoulder,  
Elastic slips  
Numerously.  
No angle resists...”*

Stephanie Cohen

## **Resumo**

### **Forma fractal no ensino de projeto arquitetônico assistido por computador**

O surgimento da Arquitetura Fractal ocorre quando conceitos da Geometria Fractal passam a ser aplicados na arquitetura. Na metade da década de 1980, arquitetos começam a utilizar conceitos dos fractais em seus projetos, até que a Arquitetura Fractal seja identificada como uma tendência arquitetônica, a partir de 1995. Diversos pesquisadores propõem modelos de composição da forma arquitetônica ou projetos baseados na Geometria Fractal. Esta pesquisa visa a elaborar um hiperlivro para o Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e *Design* (AVAAD), voltado para o ensino de projeto arquitetônico assistido por computador (*CAAD – Computer-Aided Architectural Design*). O resultado é um conteúdo pedagógico sobre Arquitetura Fractal e atividades de composição de formas baseadas nos fractais como sistema generativo. Esta proposta se configura em uma estratégia para a introdução, no ensino de Arquitetura, do conteúdo Geometria e Arquitetura Fractal.

Palavras-chave: Arquitetura Fractal, Geometria Fractal, ambiente virtual de aprendizagem, sistema generativo, projeto arquitetônico assistido por computador.

**Abstract**  
**Teaching of computer-aided architectural design using**  
**fractal morphology.**

The Fractal Architecture arise occurs when concepts of Fractal Geometry are applied in architecture. Architects start using concepts of fractals in their designs in the middle of 80's. Finally, the Fractal Architecture is identified as an architectural trend from 1995 until today. Several researchers suggest methods of architectural shape composition or design methods based on fractal geometry. This investigation intends to elaborate a virtual learning object for the Virtual Learning Environment of Architecture and Design headed to Computer-Aided Architectural Design (CAAD). The result is a pedagogical content about fractal architecture and shape composition with activities based in fractals as generative system. This proposal consist in strategies to bring the content of "Fractal Geometry and Architecture" to the teaching of architecture courses.

**Keywords:** fractal architecture, fractal geometry, virtual learning environment, generative system, CAAD.



## Figuras

Fig. 01: Mapa conceitual da metodologia da pesquisa .....	18
Fig. 02: Mapa conceitual dos temas e autores da pesquisa .....	19
Fig. 03: Samambaia de Barnsley .....	29
Fig. 04: L-system utilizado nas atividades .....	30
Fig. 05: Imagens D, E, F - Samambaia .....	33
Fig. 06: Conjunto de Cantor .....	34
Fig. 07: Curva de Koch .....	35
Fig. 08: Ilha de Koch .....	36
Fig. 09: Curva de Peano .....	36
Fig. 10: Construção da Curva de Peano .....	36
Fig. 11: Curva de Minkowski .....	37
Fig. 12: Dragão Fractal.....	37
Fig. 13: Triângulo de Sierpinski.....	38
Fig. 14: Tapete de Sierpinski.....	38
Fig. 15: Conjunto de Mandelbrot .....	39
Fig. 16: Conjunto de Julia.....	39
Fig. 17: Atrator Estranho – 2.000.000 de iterações .....	40
Fig. 18: Edifício Seagram .....	42
Fig. 19: Torre Eiffel.....	43
Fig. 20: Ornamentos .....	44
Fig. 21: Ba-ila .....	44
Fig. 22: Castelo Del Monte.....	45
Fig. 23: Templo Hindu Rajarani.....	45
Fig. 24: Catedral Pokrov.....	45
Fig. 25: Catedral Gótica de Colônia .....	46
Fig. 26: Geração fractal de templo hindu .....	46
Fig. 27: Museu Guggenheim Bilbao .....	47
Fig. 28: Projeto Romeu e Julieta .....	48
Fig. 29: Seção Cinemática .....	51
Fig. 30: Escola Heinz-Galinski .....	51
Fig. 31: UFA Cinemas .....	52
Fig. 32: Storey Hall.....	52
Fig. 33: Ladrilhos de Penrose .....	52
Fig. 34: Fractile .....	53
Fig. 35: Museu Judaico .....	53
Fig. 36: Museu Fukui.....	54
Fig. 37: Externa Federation Square .....	55
Fig. 38: Detalhe Federation Square .....	55
Fig. 39: Interna Federation Square .....	55
Fig. 40: Nuvem fractal .....	56
Fig. 41: Maquete do Auditório Saint Cyprien.....	56
Fig. 42: Projeto Saint Cyprien .....	57
Fig. 43: Estrutura da Indústria Hus.....	57
Fig. 44: Maquete digital da Indústria Hus.....	57
Fig. 45: Átrio Fractal.....	58

Fig. 46: Maquete Torre Signal.....	58
Fig. 47: Centro de Visitantes de Loiseum.....	58
Fig. 48: Projeto Bankside.....	59
Fig. 49: Museu Islâmico Vista Externa .....	59
Fig. 50: Crescimento recursivo.....	60
Fig. 51: Gaveteiro Fractal 23.....	60
Fig. 52: Esponja de Menger com 2 iterações .....	60
Fig. 53: Mesa Arborism .....	61
Fig. 54: Mesa Fractal .....	61
Fig. 55: Contagem de quadrados da Casa Robie .....	67
Fig. 56: Casa Palmer .....	68
Fig. 57: Casa em Borca.....	69
Fig. 58: Contagem de quadrados - Casa em Borca .....	69
Fig. 59: Formas alternativas – dim.: 1.0, 1.1 e 1.2 .....	70
Fig. 60: Formas alternativas – dim.: 1.5, 1.6 e 1.7 .....	71
Fig. 61: Domus fractal .....	71
Fig. 62: Pavilhão 2006 .....	72
Fig. 63: Elementos básicos .....	74
Fig. 64: Traçado regulador qualificado .....	75
Fig. 65: Seção extrudada da planta .....	75
Fig. 66: Módulos fractais bidimensionais .....	76
Fig. 67: Seção extrudada do corte .....	76
Fig. 68: Sobreposição de escalas .....	77
Fig. 69: Gráfico.....	78
Fig. 70: Proposta.....	78
Fig. 71: Mapa conceitual de estratégias pedagógicas .....	112
Fig. 72: Tela de apresentação.....	119
Fig. 73: Mapa conceitual .....	119
Fig. 74: Mapa esquemático .....	120
Fig. 75: Capítulo 1 – Geometria Fractal .....	121
Fig. 76: Tapete de Sierpinski por adição.....	122
Fig. 77: Fractal triminó .....	122
Fig. 78: Triângulo de Sierpinski por adição .....	122
Fig. 79: Fractal Z.....	123
Fig. 80: Árvore do TreeGenerator .....	124
Fig. 81: Fractal do Chaoscope com escala .....	124
Fig. 82: Capítulo 3 – Forma Fractal.....	125
Fig. 83: Cubo por adição .....	125
Fig. 84: Escada do Diabo .....	126
Fig. 85: Curva de Hilbert extrudada .....	126
Fig. 86: Fractal L-system com escala.....	127
Fig. 87: Triângulo de Sierpinski aleatório .....	127
Fig. 88: Capítulo 4 – Objetos fractais .....	128
Fig. 89: Fractal L .....	128
Fig. 90: Traçado Regulador.....	128
Fig. 91: Seção extrudada da planta baixa .....	129
Fig. 92: Módulos fractais bidimensionais .....	129

Fig. 93: Módulos de Hilbert extrudados.....	130
Fig. 94: Seção extrudada do corte .....	130
Fig. 95: Sobreposição de um fractal.....	131
Fig. 96: Sobreposição de escalas .....	131
Fig. 97: Atividade compositiva 6.....	153
Fig. 98: Atividade compositiva 6.....	153
Fig. 99: Atividade compositiva 6.....	154
Fig. 100: Atividade compositiva 7.....	154
Fig. 101: Atividade compositiva 7.....	155
Fig. 102: Atividade compositiva 7.....	155
Fig. 103: Atividade compositiva 8.....	156
Fig. 104: Atividade compositiva 9.....	156
Fig. 105: Atividade compositiva 9.....	157
Fig. 106: Atividade compositiva 9.....	157
Fig. 107: Atividade compositiva 10.....	158
Fig. 108: Atividade compositiva 10.....	158

## Quadros

Quadro 1: Quadro Cronológico da Arquitetura Fractal.....	65
--	----

## Siglas<sup>1</sup>

AVA – Ambiente Virtual de Aprendizagem  
 AVAAD – Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e Design  
 CAD – *Computer-Aided Design* (Projeto Assistido por Computador)  
 CAAD – *Computer-Aided Architectural Design* (Projeto Arquitetônico Assistido por Computador)  
 CATIA – *Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application* (Aplicação Interativa Tridimensional Assistida por Computador)  
 EAD – Educação a distância  
 IFS – *Iterated function system* (Sistema de Funções Iteradas)  
 L-system – *Lindenmayer System* (Sistema de Lindenmayer)  
 TIC – Tecnologia da Informação e Comunicação

---

<sup>1</sup> O texto desta pesquisa está de acordo com o novo Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa (ACADEMIA BRASILEIRA DE LETRAS, 2009).

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.2 MOTIVAÇÃO PARA ESTUDAR A FORMA FRACTAL .....	13
1.3 JUSTIFICATIVAS .....	15
1.4 PERGUNTA DA PESQUISA .....	15
1.4 OBJETIVOS .....	15
1.4.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	16
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	16
1.5 METODOLOGIA DA PESQUISA .....	16
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
<b>2. GEOMETRIA FRACTAL.....</b>	<b>21</b>
2.1 TEORIA DA COMPLEXIDADE.....	21
2.2 O QUE É GEOMETRIA? .....	24
2.3 FORMA FRACTAL .....	25
<b>3 ARQUITETURA FRACTAL .....</b>	<b>41</b>
3.1 PRECEDENTES DA ARQUITETURA FRACTAL .....	41
3.2 ARQUITETURA E FORMA FRACTAL .....	47
3.2.1 <i>Projetos e Arquitetos</i> .....	49
3.2.2 <i>Modelos de Forma Fractal</i> .....	63
3.2.3 <i>Modelo de Baier e Sedrez</i> .....	78
3.3 CRIATIVIDADE E ARQUITETURA FRACTAL.....	79
<b>4. MÉTODOS E FERRAMENTAS .....</b>	<b>82</b>
4.1 AMBIENTE VIRTUAL DE APRENDIZAGEM EM ARQUITETURA E <i>DESIGN</i> ..	82
4.2 PROJETO ARQUITETÔNICO .....	88
4.3 PROJETO ARQUITETÔNICO ASSISTIDO POR COMPUTADOR .....	92
4.4 ENSINO DE FRACTAIS .....	98
<b>5. <i>DESIGN</i> E APLICAÇÃO DO HIPERLIVRO.....</b>	<b>103</b>
5.1 ESTRATÉGIAS PEDAGÓGICAS ADOTADAS .....	103
5.2 FRACTAIS NAS FACULDADES DE SANTA CATARINA .....	113
5.3 HIPERLIVRO 'FORMA FRACTAL' .....	115
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>134</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>137</b>
<b>8. GLOSSÁRIO.....</b>	<b>152</b>
<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>153</b>

## 1. Introdução

*“Quando tentamos isolar alguma coisa por si só, percebemos que está ligada a tudo no universo.”* John Muir

No final da década de 1970, o matemático Benoit Mandelbrot (1983) denomina objetos matemáticos complexos de fractais<sup>2</sup>. A Teoria da Complexidade, que surge inicialmente na física e na biologia, também se expande para a matemática, especialmente por meio da Geometria Fractal. Baier (2005:116) afirma que *“a teoria dos fractais se alinha com a visão do mundo que permeia a produção da ciência contemporânea”*. A produção arquitetônica contemporânea também se apropria da Geometria Fractal como ordem reguladora (ESPANÉS, 2003), sistema generativo (CELANI, 2003) ou inspiradora de formas (JENCKS, 2002). Nesta pesquisa, levando em consideração a arquitetura contemporânea, o foco principal é a composição de arquitetura resultante das regras generativas oferecidas pelos fractais.

Na transição do movimento Modernista para o Pós-modernista, a arquitetura fragmenta-se em muitas tendências (BENEVOLO, 2007), dentre elas a Arquitetura Fractal (JENCKS, 2002). Alguns arquitetos buscam alternativas para o estilo internacional Modernista. Segundo Afonso (1985), o Pós-modernismo elabora a morfologia conhecida por contextualismo, *“bem como uma linguagem mais rica, baseada na metáfora, no repertório de imagens históricas”*. Alguns arquitetos então produzem projetos que utilizam fractais em seu desenvolvimento. Entende-se adequado incluir a Geometria Fractal no ensino de arquitetura visto seu caráter contemporâneo e o seu potencial como sistema generativo de formas.

Devido à característica complexa dos fractais, estuda-se esse tema a partir de ferramentas computacionais: o ensino de projeto arquitetônico assistido por computador (CAAD – *Computer-Aided Architectural Design*) e o Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e *Design* (AVAAD), agrupando todo o conteúdo por meio de um hiperlivro<sup>3</sup>. São estabelecidas, então, estratégias pedagógicas específicas que definam esta

---

<sup>2</sup> Fractal: do latim quebrado, fragmentado. (MANDELBROT, 1983)

<sup>3</sup> Hiperlivro é um material didático que possibilita a utilização de diversas mídias e é acessível pelo Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e Design – AVAAD.

abordagem dentro do ensino digital. A motivação desta pesquisa será explorada a seguir.

## 1.2 Motivação para Estudar a Forma Fractal

*“O mundo real é complexo e contraditório.”* Tadao Ando

Esta pesquisa trata a Geometria Fractal como uma ferramenta potencial para o estudo de sistemas generativos de formas no projeto de arquitetura. Por isso, além dos princípios teóricos que podem guiar os partidos arquitetônicos, é interessante conhecer os modelos que fazem uso prático da morfologia dos fractais. Assim, cria-se uma proposta pedagógica para o ensino de projeto arquitetônico assistido por computador, estudando a composição da forma e tomando como elemento regulador a forma fractal.

O conhecimento da geometria ajuda o arquiteto na criação da forma de um edifício. Refletindo sobre essa ideia, Ostwald (2001, tradução nossa) afirma que:

*arquitetos contemporâneos, bem como  
arquitetos ao longo da história, têm  
pouco interesse na geometria ou na  
matemática, mas valorizam a  
geometria por sua habilidade de  
fornecer uma conexão simbólica,  
metafórica ou trópica para algo mais.*

Desta observação de Ostwald, entende-se que, apesar de usarem a geometria intuitivamente para valorizar o aspecto abstrato da forma, os arquitetos não aprofundam seu conhecimento nas características matemáticas ou técnicas da geometria. É necessário promover o interesse pela geometria no ensino de projeto através de relações práticas que forneçam alternativas para a criação de formas, permitindo ao aluno o desenvolvimento do seu repertório de formas muito antes de avançar na definição do projeto, conforme indica Mayer e Turkienicz (2008).

Reforçando o pensamento de Ostwald, Alexander (1973:14, tradução nossa) observa que a matemática *“pode*

*converter-se em uma ferramenta muito eficaz se for usada para explorar a ordem e pauta conceitual que um problema impõe a um projetista*". Os projetos da arquitetura atual não poderiam ser elaborados sem o conhecimento matemático avançado (JODIDIO, 2007) e recentemente sem conhecimento de informática (SZALAPAJ, 2005). Talvez o interesse dos arquitetos pela matemática esteja se ampliando por uma real necessidade.

Estudar a geometria em geral também contribui com o aprimoramento da criatividade. No caso de arquitetos, estes criam ao longo do tempo um vocabulário formal. Espanés (2003:118, tradução nossa) acrescenta ainda que usar a Geometria Fractal como ordenadora "*no processo criativo [...] contribui para a tradução da idéia essencial na forma arquitetônica*", ou seja, indica regras de sistema generativo de formas. E Celani (2004) utiliza os fractais por sua característica generativa no suporte de atividades que exploram a criatividade na manipulação de CAD. O estudo dos fractais é recente no campo da arquitetura e traz experiências morfológicas cujo foco é a criatividade. Por isso, a pesquisa busca aprofundar o estudo a respeito da utilização da Geometria Fractal como sistema generativo de formas.

Existe na bibliografia de apoio um conjunto de informações elaborado sobre a Arquitetura Fractal bastante significativo, mas que de maneira alguma esgota o tema. "*Um número proeminente de exemplos de edifícios históricos que exibem formas fractais tem sido exemplificado por arquitetos e matemáticos*" (OSTWALD, 2001, tradução nossa). Também se considera os modelos de tradução dos fractais para arquitetura que foram explorados recentemente por arquitetos e pesquisadores, como por exemplo, Bovill (1996), no livro 'Geometria Fractal na Arquitetura e *Design*'; Espanés (2003), no livro 'Fractais e Formas Arquitetônicas'; e Haggard, Cooper e Gyovai (2006), em 'Arquitetura Fractal: projeto para sustentabilidade'.

A pesquisa aponta para a morfologia de fractais, contribuindo para a criatividade e potencializando o ensino de projeto arquitetônico assistido por computador (CAAD). Portanto, trabalhar este conteúdo em um ambiente virtual de aprendizagem pode facilitar a conexão e aplicação dos conhecimentos, pois o aluno desenvolve o estudo dos objetos

fractais no mesmo instante da aprendizagem, dentro do seu ritmo. O AVAAD (Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e *Design*) possui funcionalidades capazes de valorizar a aprendizagem digital deste tema repleto de recursos visuais e atende a expectativas quanto às estratégias pedagógicas a serem adotadas.

### **1.3 Justificativas**

Justifica-se a realização desta pesquisa pelas seguintes considerações:

1. da importância do estudo da geometria em arquitetura;
2. da contemporaneidade dos fractais perante o conhecimento científico;
3. da influência dos fractais na arquitetura (modelos de Arquitetura Fractal e edifícios projetados);
4. da possibilidade de utilização da gramática de formas, que surge do sistema generativo da Geometria Fractal.

### **1.4 Pergunta da Pesquisa**

Levando-se em consideração o potencial das formas fractais, os modelos de tradução da Geometria Fractal para a arquitetura que evocam esse potencial e os diversos edifícios concebidos sob a ótica fractal, surge a pergunta da pesquisa:

**como incluir o conteúdo Forma Fractal no ensino de projeto arquitetônico assistido por computador?**

### **1.4 Objetivos**

Para responder à pergunta, estão estabelecidos objetivos que, atendidos por meio de procedimentos metodológicos de



pesquisa, desenvolvem o resultado esperado: relacionar forma fractal e projeto arquitetônico assistido por computador.

#### **1.4.1 Objetivo Geral**

Elaborar um hiperlivro para o Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e *Design* (AVAAD) voltado ao ensino de projeto arquitetônico assistido por computador (CAAD), com o conteúdo de Forma Fractal, utilizando os fractais como sistema generativo de formas.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

1 – Identificar a existência do conteúdo de Geometria Fractal nos currículos das faculdades de Arquitetura de Santa Catarina.

2 – Organizar o conteúdo didático sobre Arquitetura Fractal, sintetizando os métodos de composição fractal na arquitetura contemporânea e seus arquitetos protagonistas.

3 – Modelar um hiperlivro com o conteúdo Arquitetura Fractal, composição e morfologia, orientados pela Geometria Fractal na arquitetura, conforme as teorias e estratégias pedagógicas selecionadas.

### **1.5 Metodologia da Pesquisa**

Esta pesquisa é desenvolvida no Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósArq – da Universidade Federal de Santa Catarina, sob orientação da professora Alice T. Cybis Pereira, PhD. A linha de pesquisa seguida é a de Planejamento e Projeto de Arquitetura, focando nos fractais como sistema generativo de formas para CAAD. O

resultado está contemplado e disponível no núcleo Forma do AVAAD.

Esta pesquisa se enquadra como dissertação científica argumentativa e segue os procedimentos metodológicos elencados a seguir. Para desenvolver estratégias pedagógicas para o ensino de Arquitetura Fractal através de um ambiente virtual de aprendizagem, a pesquisa toma uma abordagem exploratória e qualitativa e é guiada pelos procedimentos:

1 – Inicia-se por uma revisão exploratória da literatura sobre Geometria Fractal, abordando o histórico, os conceitos e o ensino de fractais. Seguindo com a revisão descritiva e sintética dos métodos de composição fractal e apresenta, por meio de imagens e textos, os projetos dos arquitetos protagonistas do tema. A primeira parte desta dissertação consiste na pesquisa bibliográfica a respeito dos quatro grandes temas que estão envolvidos: Geometria Fractal, Arquitetura Fractal, AVAs e CAAD.

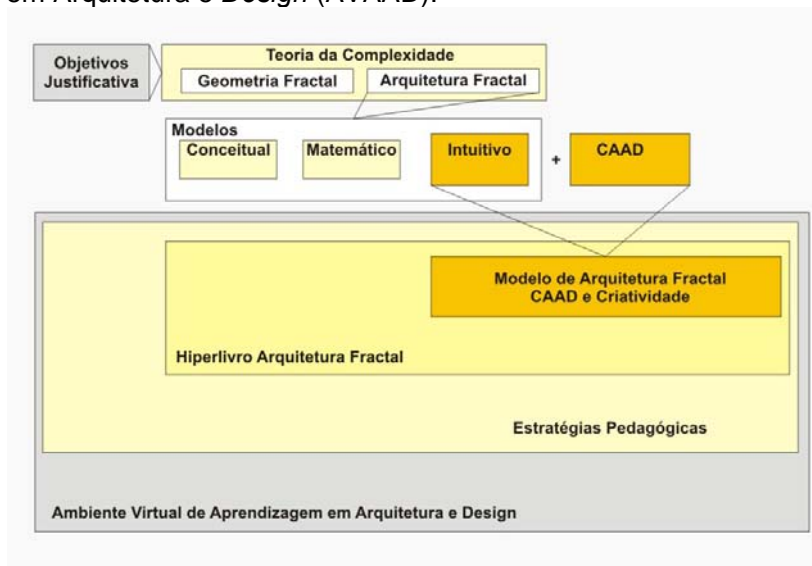
2 - Uma pesquisa nos currículos dos cursos de Arquitetura do estado de Santa Catarina é realizada para identificar a inserção do tema nestas faculdades, por meio de questionário aos coordenadores dos cursos.

3 - Os métodos de *design* instrucional, o AVA apropriado e técnicas de projeto assistido por computador são estudados através de uma análise exploratória e descritiva da literatura. Estes instrumentos são necessários para o desenvolvimento de estratégias pedagógicas. A partir dessa leitura, o texto é produzido.

4- O resultado final é traduzido em um hiperlivro com exercícios de composição para CAAD. Isto possibilita a interação do estudante com o conteúdo para desenvolver a percepção visual, a criatividade e a intuição, importantes para a concepção da forma fractal. O hiperlivro é introduzido como material optativo a uma turma de graduação, gerando então uma discussão sobre o tema abordado.

A metodologia desta pesquisa está explicada na figura 1 (p. 18), que apresenta o percurso metodológico por meio de um mapa conceitual. Primeiro são feitas as definições de objetivos, justificativa e temas (Geometria Fractal e Arquitetura Fractal) da pesquisa. Elabora-se o estudo dos modelos de tradução dos fractais para arquitetura. Busca-se uma abordagem dos fractais

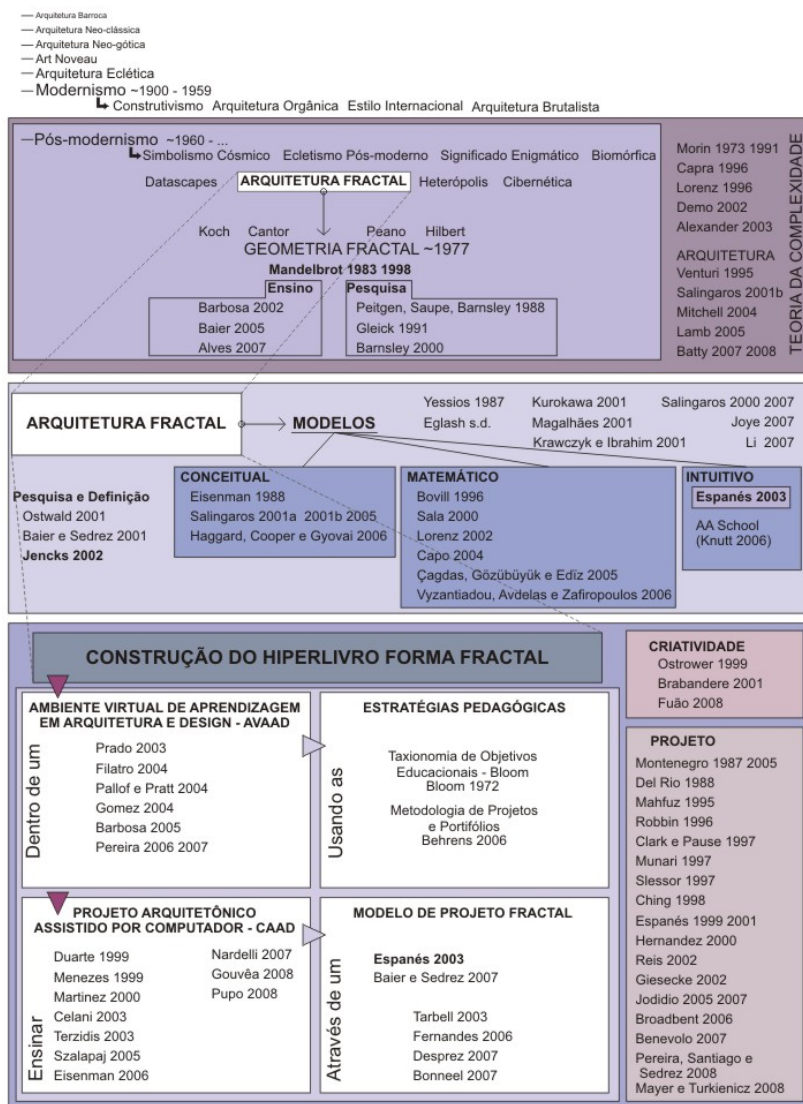
como sistema generativo de formas em projeto arquitetônico. Propõe-se a criação do conteúdo da disciplina CAAD e Criatividade, baseado em estratégias pedagógicas que atendam aos objetivos da pesquisa, ensinado por meio do hiperlivro 'Forma Fractal' inserido no Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e Design (AVAAD).



**Fig. 01: Mapa conceitual da metodologia da pesquisa (Do autor)**

## 1.6 Estrutura da Dissertação

Esta pesquisa está construída a partir do mapa conceitual dos principais temas abordados e respectivos autores (ver figura 2, p. 19), seguindo a metodologia definida anteriormente. A pesquisa inicia com a identificação da Arquitetura Fractal no contexto histórico e teórico da arquitetura contemporânea, bem como sua inserção na Teoria da Complexidade e a fundamentação da Geometria Fractal. Do tema Arquitetura Fractal buscam-se pesquisas e a definição do termo, características e conceitos, cujo resultado é a divisão em modelos de tradução dos fractais para arquitetura.



**Fig. 02: Mapa conceitual dos temas e autores da pesquisa (Do autor)**

Neste capítulo, Introdução, apresenta-se uma visão geral da pesquisa, a motivação para o estudo da forma fractal por

estes métodos, a pergunta e os objetivos da pesquisa e o processo metodológico escolhido. O Capítulo 2, com o título de Geometria Fractal, ilustra o tema fractal inserido na Teoria da Complexidade para a compreensão do panorama científico contemporâneo. Em seguida, explica-se a Geometria Fractal, seus aspectos históricos e matemáticos e mostra-se sua contribuição para a criação de formas.

O Capítulo 3 intitulado de Arquitetura Fractal, pois estuda as questões referentes a esta tendência: seus precedentes, ou seja, edifícios que possuem composição relativa aos fractais, antes da definição do termo fractal; e o posicionamento desta tendência no pós-modernismo. Apresenta também o panorama da Arquitetura Fractal, ilustrado através dos projetos principais e os modelos de tradução dos fractais para arquitetura, aprofundando o estudo no modelo de Espanés. Finaliza o capítulo com a questão da criatividade emergente da forma fractal.

O Capítulo 4 apresenta os Métodos e Ferramentas necessárias para o desenvolvimento do hiperlivro. Explica-se o AVAAD e sua contribuição como suporte para o conteúdo. As práticas utilizadas na composição da forma em projeto arquitetônico são abordadas, para então explicar a postura diante do panorama tecnológico e da complexidade a que está imerso o CAAD. As questões do ensino de fractais são tratadas finalizando este capítulo.

No Capítulo 5 trata-se do *Design* e Aplicação do Hiperlivro, explicam-se as estratégias pedagógicas adotadas e o ensino de Arquitetura Fractal em Santa Catarina no presente momento. Apresenta-se como está construído o resultado desta pesquisa: hiperlivro 'Forma Fractal'. Explica-se qual o conteúdo selecionado, ferramentas, decisões e quais as atividades elaboradas com os exemplos construídos pelo pesquisador e o resultado dos alunos. E no Capítulo 6 apresentam-se as Conclusões desta abordagem do tema Arquitetura Fractal, e sugestões para a continuidade da pesquisa. Na sequência, estão o Referencial Bibliográfico, um breve Glossário e os Anexos resultantes das atividades dos alunos.

## 2. Geometria Fractal

Este capítulo trata do contexto da complexidade, do qual fazem parte os fractais, e os aspectos matemáticos da Geometria Fractal. Esta contextualização procura introduzir e elucidar o conteúdo para os capítulos posteriores.

### 2.1 Teoria da Complexidade

*“A Teoria da Complexidade nos impulsiona para uma visão mais holística.”* Michael Batty

Teoria da Complexidade é a ciência que estuda os fenômenos de sistemas dinâmicos não lineares, em aspectos físicos, biológicos ou matemáticos, como por exemplo, tempestades ou furacões, campos magnéticos, crescimento de população, previsão climática e órbita de planetas. Estes fenômenos naturais não são efetivamente descritos pela ciência clássica. Muitos deles são até desconsiderados por ela. Barbosa (2002:10) relata que a Complexidade *“trouxe consigo o ver ordem e padrões, onde anteriormente só se observava o irregular, o aleatório, o imprevisível [...]”*. A Teoria da Complexidade e a Teoria do Caos não são ciências distintas. Ambas trabalham o desenvolvimento de temas comuns.

Edward Lorenz (1996), matemático e meteorologista, considerado o pai da Teoria do Caos e idealizador da expressão ‘efeito borboleta’<sup>4</sup>, estuda, na década de 1960, manifestações meteorológicas. *“Efeito borboleta é o fenômeno no qual uma pequena alteração no estado de um sistema dinâmico fará com que os estados subsequentes sejam bastante diferentes dos estados que teriam se seguido sem essa alteração específica”* (LORENZ, 1996:252). Lorenz (1996) afirma que não poderia ter construído alguns de seus conhecimentos sem os estudos de Poincaré, sobre a dinâmica dos corpos celestes, por exemplo.

---

<sup>4</sup> ‘O bater de asas de uma borboleta no Brasil desencadeia um tornado no Texas?’ é o título do artigo de Edward N. Lorenz (1996:28) que gerou a expressão efeito borboleta.

A Teoria do Caos lida com os conceitos de ordem e desordem, demonstra que um sistema caótico possui uma ordem específica e que há meios de entendê-la. Morin (1973:112, tradução nossa) classifica a desordem como *“todo fenômeno que, em relação ao sistema considerado parece obedecer ao acaso e não ao determinismo do sistema, tudo aquilo que não obedece à estrita aplicação mecânica das forças segundo os esquemas pré-fixados da organização”*. As obras de Morin (1991) colocam que a complexidade não está mais distante das ciências contemporâneas.

Ampliando essa definição, Morin (1973:42-43, tradução nossa) entende a complexidade como:

*[...] um fenômeno quantitativo, a extrema quantidade de interações e de interferências entre um número muito grande de unidades. [...] Qualquer sistema auto-organizador (vivo), mesmo o mais simples, combina um número muito grande de unidades da ordem de bilhões, quer de moléculas numa célula, quer de células no organismo [...]. Mas a complexidade não compreende apenas quantidades de unidades e interações que desafiam as nossas possibilidades de cálculos, compreende também incertezas, indeterminações, fenômenos aleatórios.*

O estudo de sistemas complexos por meio de sistemas dinâmicos não lineares é um dos campos de abrangência da teoria da Complexidade desde a segunda metade do Século XX. A Teoria da Complexidade atualmente considera, por exemplo, as pesquisas de Capra (1996) a respeito do tema, que servem como suporte para a produção científica contemporânea, inclusive no campo da arquitetura. A pesquisa de Lamb (2006) a respeito da complexidade em arquitetura e urbanismo, aplicada ao estudo de ciclovias, baseou-se em autores como Capra, Salingaros e Morin. A característica principal dos sistemas dinâmicos não lineares é seu aspecto aleatório ou caótico, ou seja, apesar do sistema funcionar segundo parâmetros estabelecidos, um resultado preciso é imprevisível. Os sistemas

complexos da natureza se aproximam da ciência dos fractais por suas características como a irregularidade dos limites, a realimentação e a repetição, não linearidade e conectividade.

Para Jencks (2002:210, tradução nossa), *“as ciências da vida e hipóteses sistêmicas guiaram teóricos como Jane Jacobs e Robert Venturi a privilegiar a complexidade vinte anos antes que a Teoria da Complexidade fosse uma idéia unificada por trás da ciência contemporânea, em meados dos anos 80”*. Os fractais só começaram a ser utilizados na arquitetura em 1985, quando se estreitam as ligações entre as ciências e os estudos da complexidade. Jencks (*ibid*), ao observar o direcionamento científico para este pensamento, esclarece que Arquitetura Fractal faz parte da Teoria da Complexidade: *“por isso o título deste capítulo (arquitetura complexa), e o seguinte, sobre fractais, é uma das chaves científicas da complexidade que emergiu para explicar a geometria da natureza”*.

Magalhães (2001:250) explica que a Teoria da Complexidade, os sistemas auto-reguláveis e a dinâmica não linear *“entendem que as formas do futuro tenderão a reproduzir a natureza [...] baseando-se agora nas formas invisíveis reveladas pela teoria quântica, pelos fractais [...]”*. As formas do futuro previstas por Magalhães são as formas da arquitetura na tendência biomórfica ou na tendência fractal, registradas por Jencks (2002). Mandelbrot (1998:209) explica que *“o estudo do caos determinista deu origem a inúmeras formas geométricas muito complicadas. A geometria habitual é absolutamente incapaz de tratar”*. Mas os arquitetos parecem cada vez mais incorporar a complexidade em seus projetos, conforme aponta a abordagem nos próximos capítulos.

Por isso, a arquitetura também é um sistema que deve considerar a complexidade, como afirma Venturi (1995) no livro ‘Complexidade e Contradição em Arquitetura’ e como se posiciona Lamb (2006) em sua dissertação ‘Complexidade em Arquitetura e Urbanismo’. Conhecer os fractais é uma maneira de entender a complexidade e trabalhar esse conhecimento na arquitetura. Por exemplo, no urbanismo, de acordo com Batty (2008:1, tradução nossa) *“conceitos chave da complexidade como scaling [escalante], autossimilaridade e estruturas de equilíbrio distante dominam nosso atual tratamento das cidades [...]”*. *Scaling* e autossimilaridade são conceitos principais da



Geometria Fractal, facilitando essa compreensão. Para Mandelbrot (1998:18), “*entre o domínio do caos desregulado e a ordem excessiva de Euclides existe agora a nova zona da ordem fractal*”.

Magalhães (2001:251-253), a partir de sua análise do livro ‘*The Architecture of Jumping Universe*’, de Charles Jencks, resume as posturas que os arquitetos contemporâneos podem assumir ao considerarem a Teoria da Complexidade, dentre as quais se destaca para esta pesquisa:

- 1) Incluir os sistemas naturais e culturais nos projetos;
- 2) Compreender as novas formas de organização do processo criativo, situado na fronteira entre a razão e emoção, ordem e caos. Entender que os fractais como formas similares são positivos;
- 3) Entender que os processos naturais são não lineares e incluir o conceito de realimentação;
- 4) Absorver a alta tecnologia que vem transformando a forma arquitetônica.

Sendo assim, podemos considerar que os fractais são formas que se aproximam das naturais e, portanto, abordá-los em uma arquitetura que respeite a cultura e a natureza é possível. O processo criativo de geração de formas baseado na Geometria Fractal é um estudo recente. A realimentação, sobreposição, *scaling* e autossimilaridade de elementos urbanos ou arquitetônicos são conceitos de difícil compreensão sem o conhecimento dos fractais. Por fim, a alta tecnologia e o avanço da informática tornam o uso de fractais algo natural e possível.

## 2.2 O que é Geometria?

É difícil afirmar quando surge a geometria, mas sabe-se que ela foi necessária quando o ser humano começou a demarcar terras e plantações e construir edifícios. Algumas noções primitivas surgem no Egito e Mesopotâmia para refazer as medidas dos terrenos após as inundações. Euclides de Alexandria define os princípios básicos da geometria em torno de 300 a.C. e até hoje são válidas suas definições de ponto, reta, plano e figuras elementares.

Pode-se descrever brevemente Geometria<sup>5</sup> como a ciência matemática que estuda as formas e suas relações no espaço: dimensão, área, volume, tamanho, proporção. Expressa também a capacidade de relacionar objetos, medir e avaliar formas. Segundo Peitgen, Saupe e Barnsley (1988:26, tradução nossa) é: *“a linguagem matemática para descrever, relacionar e manipular formas”*. A geometria é fundamental para praticamente todas as profissões e sua aprendizagem inicia no ensino básico, visto que na pré-escola já se lida com formas geométricas.

De acordo com Clark e Pause (1997:6, tradução nossa), a geometria *“é uma idéia generativa da arquitetura que engloba os princípios da geometria do plano e do volume para delimitar a forma construída”*. Um dos interesses básicos dos arquitetos é descrever, relacionar e manipular formas, com o objetivo de imaginar, criar e dominar os volumes esteticamente. Para Venturi (1995:13), a arquitetura é *“forma e substância. [...] Um elemento arquitetônico é percebido como forma e estrutura, textura e material”*. A geometria na arquitetura, então, pode ser sintetizada como um método gráfico de moldar uma forma. Nesta pesquisa, a questão da forma está voltada para um sistema generativo e a composição de volumetrias utilizando fractais.

Estuda-se nesta pesquisa a composição da forma em arquitetura, que usualmente valoriza a Geometria Euclidiana. A partir de regras generativas da Geometria Fractal pode-se compor utilizando os princípios indicados por Clark e Pause (1997): simetria, adição e subtração e geometria. A seguir os conceitos matemáticos da Geometria Fractal são explicados, assim como a relação entre os fractais e a Geometria Euclidiana. Esta contextualização serve para extrair o conteúdo morfológico dos fractais para o projeto de arquitetura.

## 2.3 Forma Fractal

*“Assim que percebermos que somos conectados a estruturas fractais, iremos apreciar mais uma árvore do que um cubo de vidro.”* Nikos A. Salingaros

---

<sup>5</sup> Do grego: *geo* = terra e *metria* = medir.

A Geometria Euclidiana é essencial para a construção de objetos na arquitetura e usualmente para representar figuras simples, lisas e com dimensão finita. “Apesar da riqueza desta geometria tanto para a descrição quanto para a criação, os cientistas descobriram que há certos fenômenos que fogem das regras deste sistema (ESPANÉS, 2001:144, tradução nossa)”.

Peitgen, Saupe e Barnsley (1988:25-26, tradução nossa) explicam a relação entre a Geometria Fractal e a Geometria Euclidiana dizendo que:

*[...] primeiro, fractais são decididamente uma invenção moderna. [...] Segundo, enquanto formas Euclidianas têm um ou no máximo alguns tamanhos característicos ou escalas de comprimento (o raio de uma esfera, o lado de um cubo), fractais [...] não têm tamanho característico. Formas fractais são ditas como autossimilares e independentes de escala ou escalonamento. Terceiro, a Geometria Euclidiana fornece descrições precisas e exatas de objetos feitos pelo ser humano, mas é inadequada para formas naturais. [...] Por último, enquanto que formas Euclidianas são usualmente descritas por uma simples fórmula algébrica, fractais, em geral, são o resultado de um procedimento construtivo ou algoritmo que é frequentemente recursivo (repetido infinitamente) e idealmente gerado por computador.*

A Geometria Fractal deve ser entendida como uma extensão e um complemento da Geometria Euclidiana. Projetistas que conhecem apenas o raciocínio euclidiano acabam por utilizar os pressupostos desta geometria na composição da forma ou conceito dos seus projetos. Celani (2004) sugere que a Geometria Euclidiana aliada a regras de proporção seja estabelecida como solução única que impõe limitações formais

ao projeto, apesar de facilitar o trabalho do projetista ao reduzir o número de soluções. Por isso, ao incluir fractais no ensino de projeto, a Geometria Euclidiana serve como base e a Geometria Fractal permite um vocabulário rico, diverso e infinito, apoiado em regras de iteração generativas.

A principal diferença entre as duas geometrias que interessam a essa pesquisa é a produção de formas e o aspecto criativo envolvido nos fractais. Segundo Jodidio (2005:15), “*as formas Euclidianas irão continuar certamente a existir na arquitetura, mas o molde partiu-se*”. As formas euclidianas a que ele se refere são as puras, lisas, sem irregularidades. Os fractais podem produzir formas complexas por meio do processo de iteração. A construção desses objetos tem um caráter aleatório, cujo resultado depende do observador.

As características da Geometria Fractal são amplas, bem como suas aplicações. Como explicado anteriormente, pode-se observar fractais em muitos objetos, como afirma Barnsley (2000) já no título de seu livro: ‘Fractais em Toda Parte’<sup>6</sup>. Alves (2007:142) divide as aplicações da Geometria Fractal em três grupos: aplicada a objetos ou fenômenos da natureza, a objetos de criação humana e as que modelam fenômenos das ciências econômicas, sociais ou humanísticas. A autora cita a presença de fractais na natureza nas áreas de conhecimento: biologia e medicina, geologia, geografia e meteorologia, na física e na astronomia; a presença de fractais em objetos criados pelo ser humano: em imagens, cinema, informática, tecnologia, indústria, na música, pintura, fotografia e na arquitetura; e fractais presentes em estudos científicos das ciências econômicas, história, psicologia e literatura.

Ao focar no aspecto da geometria das formas fractais e suas regras generativas, contribui-se para o desenvolvimento de uma gramática de formas. Segundo Celani (2004), “*um dos assuntos com os quais a teoria da arquitetura se preocupa é o da geração das formas*”. A maneira pela qual a Geometria Fractal pode gerar formas e como estas formas podem ser usadas na arquitetura é um ponto importante.

Inicialmente, deve-se ter ciência de que a Geometria Fractal surge de objetos matemáticos anteriormente conhecidos

---

<sup>6</sup> Título original: *Fractals Everywhere*.

como monstros, pois aparentemente distorciam os conceitos euclidianos. E surge da ideia de representar formas da natureza, irregulares, com padrões caóticos. O matemático Mandelbrot (1983:1) percebe que a Geometria Euclidiana possui certas limitações e não pode representar completamente a natureza, descrevendo-a da seguinte maneira:

*Por que a geometria é chamada de fria e seca? Uma das razões encontra-se na sua incapacidade de descrever a forma de uma nuvem, uma montanha, um litoral ou uma árvore. Nuvens não são esferas, montanhas não são cones, litorais não são círculos, e cascas de árvores não são regulares e polidas, nem relâmpagos viajam em uma linha reta.*

Assim Mandelbrot chegou ao conceito de que fractais são elaborados por formas autossemelhantes ou autossimilares, por meio de um processo recursivo chamado de iteração. A iteração é um processo que segue uma regra de substituição por adição ou subtração de um elemento escalonado autossimilar ao objeto inicial. Esse processo é a repetição da transformação em uma forma. A ideia por trás dos fractais é a de que a iteração de expressões matemáticas simples, com uma ordem definida, pode produzir um comportamento complexo e irregular que parece aleatório (ESPANÉS, 2003). Os elementos para produzir um fractal são o iniciador e o gerador. Fractais complexos adicionam outros parâmetros como rotações, translações, angulações.

Mandelbrot (1998) explica que essas formas são naturais e caóticas, e que a Geometria Fractal pode ser representada pelos objetos rugosos, porosos ou fragmentados. Lorenz (2002:8, tradução nossa) afirma que

*a melhor maneira de definir um fractal é através de seus atributos: um fractal é irregular, o que significa que ele não é liso, é autossimilar, o que significa que partes parecem com o todo, é desenvolvido através de iterações, o que significa que uma transformação é*

*repetidamente aplicada e dependente da condição inicial.*

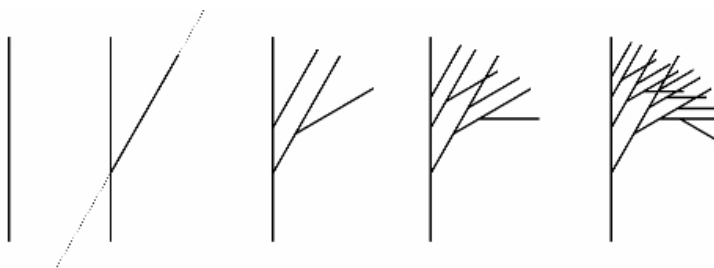
É relevante afirmar que devido à irregularidade dos fractais, é necessário fazer uma tradução para a arquitetura considerando um número limitado de iterações. Os fractais em duas dimensões são representados em um plano por meio de regras generativas, servindo como padrões para construção de composições tridimensionais. Deixa, portanto, ao ser modificado de ser um fractal ideal no aspecto matemático. Este processo se assemelha ao utilizado por Mayer e Turkienicz (2008:17) para transformação de padrões 2D em 3D. Os fractais de três dimensões são gerados por *softwares* que estão explicados no Capítulo 5.

Outra maneira de obter formas fractais complexas é por meio do resultado de um sistema de funções iteradas ou IFS - *Iterated Function System*. Lorenz (2002:20, tradução nossa) explica que os IFS “[...] *pertencem aos fractais lineares [...]. Eles são produzidos por polígonos que são organizados uns sobre os outros e apresentam um alto grau de similaridade com a natureza*”. Os IFS explicam a característica fractal da sobreposição de partes autossimilares e também apresentam características generativas que ajudam na compreensão da forma fractal (Fig. 3). Lorenz (2002:20, tradução nossa) complementa que “*nos IFS, as regras de transformação podem incluir rotação, redução, alargamento, cisalhamento e regras similares, que podem ser descritas na matemática como transformações lineares*”.



**Fig. 03: Samambaia de Barnsley** (Barnsley, 2000:103)

Outro modelo de construção de fractais usado na pesquisa são os *L-systems* ou sistemas de Lindenmayer (LINDENMAYER; PRUSINKIEWICZ, 1990:1, tradução nossa), *“uma técnica para definir objetos complexos sucessivamente substituindo partes de um objeto inicial simples usando um conjunto de regras”*. É uma gramática formal que pode ser usada para o desenho de vegetação, árvores e algumas variedades de organismos. A criação destes objetos envolve a percepção do aluno na construção de ângulos no processo iterativo, e também questões estéticas como a simetria. A Figura 4 mostra um *L-system* utilizado nas atividades propostas, cujo ângulo segue a rotação de 30 graus conforme diminui a escala.



**Fig. 04: L-system utilizado nas atividades** (Do autor)

Baier (2005:113) afirma que, na Geometria Fractal, *“trata-se de objetos matemáticos que são construídos sendo acrescentadas ou retiradas muitas partes, indefinidamente”*. Este modelo de construção segue regras específicas e pode ser utilizado na construção de arquitetura com iterações limitadas. Pode-se dividir os objetos fractais em lineares, que são objetos que podem ser construídos manualmente, com poucas iterações e que fornecem regras compositivas, e em não lineares, que somente podem ser obtidos por meio de *softwares*, pois demandam muitas iterações e acrescentam outros processos recursivos e aleatoriedade.

Uma característica inicial a conhecer é a dimensão fractal que será explicada a seguir. Mandelbrot define o termo fractal e o relaciona com a dimensão de Hausdorff-Besicovitch, ou dimensão fracionária. Segundo Mandelbrot (1998:14),

*uma das características principais de todo objeto fractal é a sua dimensão*

*fractal, que será representada por D. Esta é uma medida do grau de irregularidade e de fragmentação. Um fato muito importante: ao contrário dos números dimensionais correntes, a dimensão fractal pode muito bem ser uma fração simples, como  $1/2$  ou  $5/3$ , ou mesmo um número irracional, como  $\log 4 / \log 3 \sim 1,2618...$  ou  $\pi$ . Assim, é conveniente dizer, a respeito de certas curvas planas muito irregulares, que a sua dimensão fractal se situa entre 1 e 2, a respeito de certas superfícies muito enrugadas e cheias de pregas, que a sua dimensão fractal está entre 2 e 3 e, enfim, definir conjuntos de pontos sobre uma linha cuja dimensão fractal está entre 0 e 1.*

Certos objetos matemáticos não seguem os parâmetros euclidianos (ponto = 0, reta = 1, plano = 2 e volume = 3) e possuem dimensão que não é um número inteiro, e sim uma fração ou um número irracional, como visto acima. Ou seja, dimensão fractal é a maneira de medir a irregularidade dos objetos fractais. Sabendo das limitações da Geometria Euclidiana, Mandelbrot começa a abordar outros objetos matemáticos até chegar ao resultado da sua pesquisa: fractais. Gleick (1991:92) relata: *“como as medidas euclidianas – extensão, profundidade, espessura – não abrangem a essência das formas irregulares, Mandelbrot voltou-se para uma idéia diferente, a idéia de dimensão”*. A dimensão fractal é uma ferramenta para verificação do aspecto fractal de um objeto, ampliando conceitos da Geometria Euclidiana.

O exemplo clássico de Mandelbrot esclarece o conceito de dimensão fracionária. Qual a dimensão de um novelo de lã? A resposta depende do ponto de vista do observador. Mandelbrot (1998:21) explica:

*Para confirmar, mostraremos que um novelo com 10 cm de diâmetro feito de um fio de 1 mm de diâmetro possui, de*



*uma forma um pouco latente, diversas dimensões efetivas distintas. Se se usar um grau de resolução de 10 m, trata-se de um ponto e, portanto, de uma figura de dimensão zero. Para um grau de resolução de 10 cm, trata-se de uma bola tridimensional. Para uma resolução de 10 mm, é um conjunto de fios e, portanto, uma figura unidimensional. Para um grau de resolução de 0,1 mm, cada fio transforma-se numa espécie de coluna e o todo volta a ser tridimensional. Para um grau de resolução de 0,01 mm, cada coluna resolve-se em diversas fibras filiformes e, de novo, o todo é unidimensional. Numa análise mais apurada, o novelo é representado por um número finito de átomos pontuais e o todo tem, mais uma vez, dimensão zero. E assim por diante: o valor da dimensão não pára de variar!*

A simetria tem sido uma ferramenta bastante utilizada pelos arquitetos na composição arquitetônica. É fácil perceber por que o ser humano utiliza da simetria em suas ideias: muitos desenhos na natureza são simétricos bilateralmente, como o corpo humano, os vegetais e os animais. A simetria também é importante, pois recorre ao ritmo.

Por outro lado, também existe a similaridade: as formas dos seres humanos são padronizadas, mas nem todos são iguais. A natureza apresenta formas de estruturas que se originam organicamente (favo de mel, asa de inseto, teia de aranha) e a estrutura também é um fator a ser considerado pelo arquiteto quando pensa na forma do edifício. Essas formas seguem um padrão, uma proporção que se repete harmoniosamente em toda natureza. Lindenmayer e Prusinkiewicz (1990:177, tradução nossa) afirmam que a autossimilaridade “é uma propriedade mais fraca que a simetria,

*mas ainda assim proporciona uma valiosa visão sobre as relações entre os elementos de uma estrutura”.*

Uma parte de um fractal é igual, semelhante ou similar ao todo. Esta característica é possível, pois esses objetos são formados a partir da repetição de um processo. Segundo Lorenz (2002:10, tradução nossa), uma estrutura autossimilar se transforma, modificando a estrutura pelo mesmo fator de escala, em que *“a nova forma pode ser menor, maior, rotacionada e/ou invertida, mas a forma mantém-se similar”*. A samambaia segue um padrão de organização das folhas que mostra a autossimilaridade nas diferentes escalas (Fig. 5).



**Fig. 05: Imagens D, E, F - Samambaia (Livella, s.d.)**

Os objetos fractais possuem um conceito matemático que é o de serem infinitos. Com o auxílio de cálculos de computadores, detalhes podem ser obtidos em muitas escalas. Lorenz (*ibid*:13, tradução nossa) afirma: *“fractais são altamente complexos, isso significa que uma aproximação visual irá apresentar mais e mais detalhes, uma característica que continua infinitamente”*. Detalhes em arquitetura são a menor escala, são uma parte pequena em relação a um todo maior. Stern (2006:120) descreve que há uma *“necessidade do homem de elaborar e articular os elementos de um edifício relativamente à escala humana”*. Por isso a tradução dos fractais para arquitetura pode ir a um número finito de escalas e deve estar relacionada com a escala humana.

Os fractais são objetos formados por meio da recursividade de suas partes. De acordo com Celani (2003:41), *“na matemática, uma função recursiva é aquela que utiliza variáveis criadas durante o processo, através da aplicação sucessiva de uma mesma rotina”*. Esta característica significa

dizer que a configuração do fractal recorre a um processo de realimentação, que pode ser manual, como os exemplos apresentados, ou computacional. Realimentação consiste em alimentar o fractal com uma informação que seja similar à informação anterior, porém em outra escala.

A seguir estão relacionados alguns fractais lineares principais e que são importantes para as atividades elaboradas. O cálculo da dimensão fractal está relacionado para a compreensão desta qualidade nestes objetos. Determina-se a dimensão fractal através da seguinte fórmula:

$$D = \log N / \log n$$

Onde:

D = Dimensão

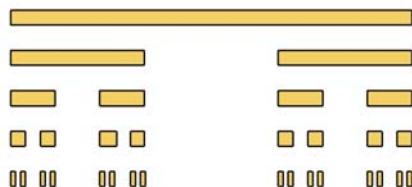
N = número de peças em cada iteração

n = ampliação necessária para chegar ao objeto original

O processo iterativo de fractais é o seu sistema generativo de formas. Segundo Yessios (1987, tradução nossa), *“o fractal, como um sistema generativo, consiste de uma forma inicial (a base) e um ou mais geradores. O gerador, do ponto de vista prático, é uma regra de produção: substitui cada e todos os segmentos da base com a forma do gerador”*. Para compreender os exemplos, utiliza-se um objeto inicial, iniciador, e um objeto que substitui o objeto inicial, gerador, indicando o processo de iteração. Adiante, a pesquisa apresenta como estes objetos e os seus conceitos generativos foram utilizados para criação de objetos de arquitetura.

Poeira ou Conjunto de Cantor

O iniciador é um segmento de reta qualquer. Divide-se o segmento em três partes iguais e desconsidera-se (subtrai-se) o segmento central. O gerador é uma subtração (Fig. 6, p. 36). Repetir a operação com os segmentos restantes, indefinidamente, é o processo iterativo.

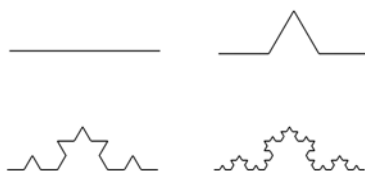


**Fig. 06: Conjunto de Cantor** (Do autor)

Assim:  $N = 2$  e  $n = 3$ ;  $D = \log 2 / \log 3$ ;  $D \cong 0,63...$  A dimensão entre 0,63 mostra que o conjunto está um pouco mais próximo de ser uma reta. Aqui, se decidiu representar a linha um pouco espessa para ficar um exemplo claro aos alunos.

#### Ilha e Curva de Koch

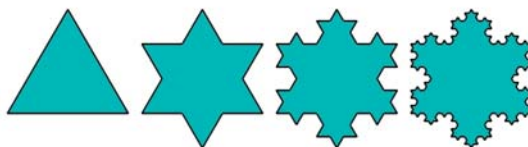
De acordo com Celani (2003:41), “*embora nos pareça uma figura simples, é uma figura complexa. A Curva de Koch é gerada a partir de uma regra extremamente simples*”. O iniciador é uma linha qualquer. Divide-se o segmento em três partes e substitui-se o segmento central por um triângulo equilátero sem a base. Essa figura é o gerador, que possui quatro retas de tamanho igual (Fig. 7). Deve-se repetir o processo com todos os outros segmentos, ou seja, iterar sucessivamente.



**Fig. 07: Curva de Koch** (Do autor)

Assim:  $N = 4$  e  $n = 3$ ;  $D = \log 4 / \log 3$ ;  $D \cong 1,26...$  A curva está bem próxima de uma reta (dimensão 1).

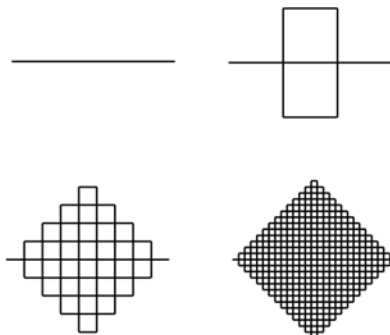
A forma da Curva de Koch pode ser modificada. Ao se inverter aleatoriamente a direção do triângulo do gerador ou usar outra figura qualquer no lugar do triângulo, as possibilidades são infinitas. Quando este processo iterativo é aplicado a um triângulo, obtém-se a ilha ou floco de neve de Koch (Fig. 8). O iniciador neste caso é um triângulo equilátero. Uma característica interessante é a de que cada vez que a regra é aplicada, o perímetro da Ilha de Koch é aumentado em  $1/3$ , enquanto sua área sofre aumento gradativamente menor e, portanto, desproporcional ao aumento do perímetro.



**Fig. 08: Ilha de Koch** (Do autor)

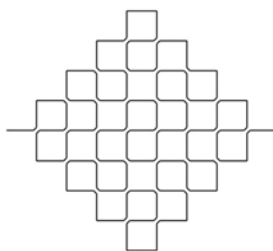
### Curva de Peano

O iniciador da Curva de Peano é uma reta, que dividida em três partes iguais pode ser substituída por um gerador com nove segmentos iguais. A partir da primeira iteração, substitui-se novamente cada segmento pelo gerador escalonado (Fig. 9). Assim:  $N=9$  e  $n=3$ ;  $D = \log 9 / \log 3$ ;  $D = 2$  E a curva então pode ser considerada com dimensão 2.



**Fig. 09: Curva de Peano** (Do autor)

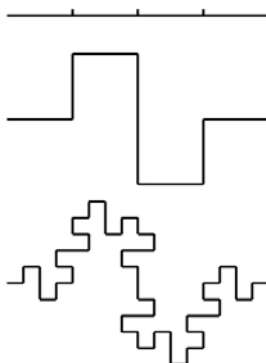
A Curva de Peano pode ser desenhada sem tirar o lápis do papel, em um processo manual. A Figura 10 exemplifica a maneira correta da construção deste objeto. Mostrando a segunda iteração, com as retas de esquinas chanfradas para melhor visualização.



**Fig. 10: Construção da Curva de Peano** (Do autor)

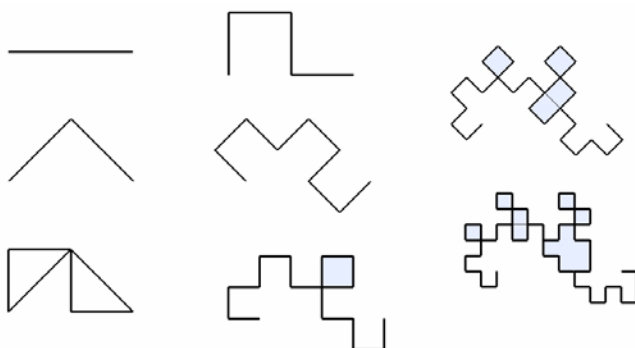
### Curva de Minkowski

A Curva de Minkowski é construída a partir de um iniciador dividido em quatro segmentos iguais. Os segmentos centrais são substituídos por dois quadrados, um sem a base e outro sem o topo, conforme a Figura 11. O processo iterativo continua infinitamente e pode acrescentar-se aleatoriedade às iterações.



**Fig. 11: Curva de Minkowski** (Do autor)

Assim:  $N = 8$  e  $n = 4$ ;  $D = \log 8 / \log 4$ ;  $D = 1,5$ . Outro fractal que segue a mesma tipologia de construção por substituição é o Dragão Fractal (Fig. 12).

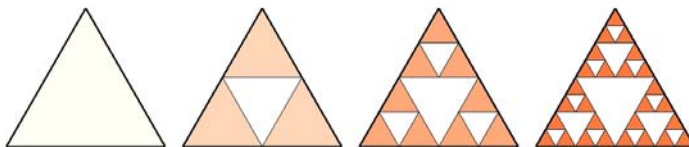


**Fig. 12: Dragão Fractal** (Do autor)

A dimensão deste é objeto é:  $N=4$  e  $n=2$ ;  $D = \log 4 / \log 2$ ;  $D = 2$ .

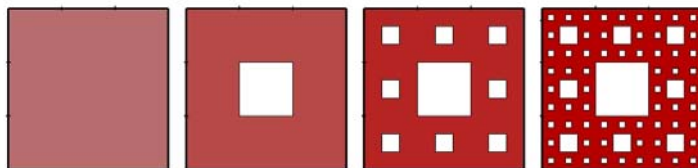
### Triângulo de Sierpinski

Para criar o Triângulo de Sierpinski (Fig. 13), deve-se começar com um triângulo equilátero e remover o triângulo central do iniciador. O triângulo a ser removido é definido pelos pontos centrais de cada lado do triângulo inicial.



**Fig. 13: Triângulo de Sierpinski** (Do autor)

Assim:  $N = 3$  e  $n = 2$ ;  $D = \log 3 / \log 2$ ;  $D = 1,58...$  Outro exemplo é o Tapete de Sierpinski, que segue o mesmo processo iterativo do Triângulo de Sierpinski, conforme Figura 14.

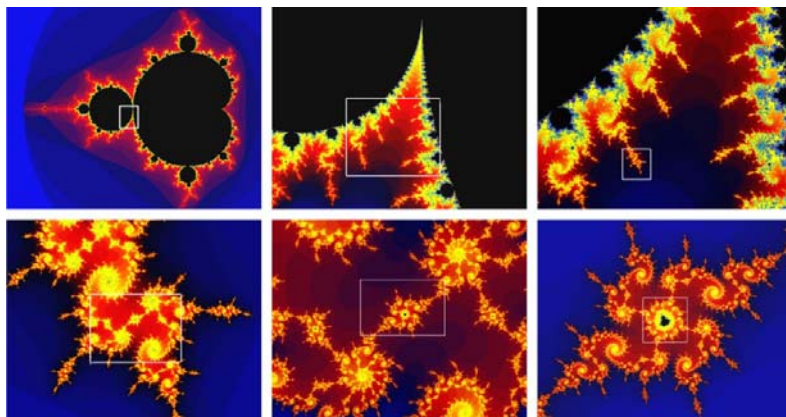


**Fig. 14: Tapete de Sierpinski** (Do autor)

Assim:  $N = 8$  e  $n = 3$ ;  $D = \log 8 / \log 3$ ;  $D = 1,89...$  Pode-se concluir que a dimensão fractal não torna a dimensão euclidiana obsoleta, e sim a torna mais abrangente (Baier, 2005:115).

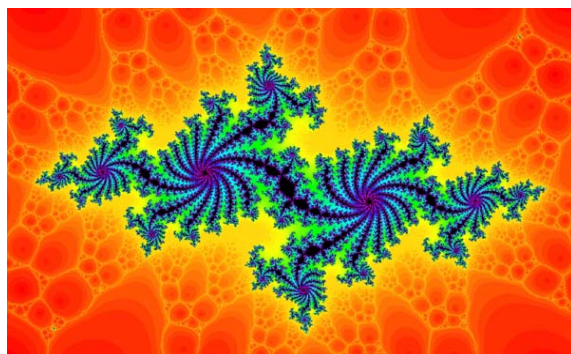
### Fractais não lineares

O Conjunto de Mandelbrot é o mais conhecido objeto fractal, devido a sua alta complexidade. Esse objeto, apesar de apresentar autossimilaridade, possui detalhes variados nas diferentes escalas. Ele foi visualizado em um computador pela primeira vez por Mandelbrot a partir dos estudos de Gastón Julia e Pierre Fatou. No Conjunto de Mandelbrot, definido como um conjunto de pontos  $c$  no plano complexo, é possível encontrar alguns conjuntos de Julia. A fórmula para gerar esse objeto matemático é  $z_{n+1} = z_n^2 + c$ , podendo-se assim descobrir quais pontos fazem parte do conjunto (Fig. 15, p 39).



**Fig. 15: Conjunto de Mandelbrot** (Keyserling, s.d.)

Os conjuntos de Julia (Fig. 16) estão implícitos no Conjunto de Mandelbrot e são sistemas dinâmicos complexos, expressos pela fórmula  $f_c(z) = z^2 + c$ .

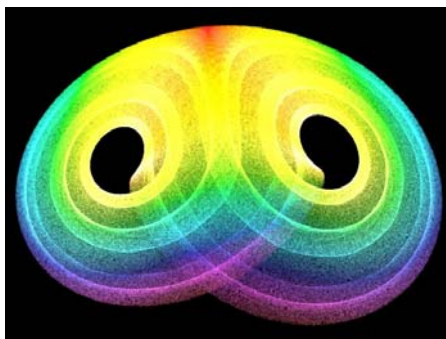


**Fig. 16: Conjunto de Julia** (Keyserling, s.d.)

O Atrator Estranho de Lorenz tem esse nome pois a trajetória de todos os pontos iniciais do conjunto acaba seguindo uma ordem, ou seja, atraindo para o mesmo lugar. Porém, uma pequena variação no ponto inicial afeta a trajetória obtida. Por isso, esse conjunto também denotou o que se conhece por efeito borboleta. Por menor que seja a alteração, pode causar grandes efeitos, que é um dos princípios do caos. Nos sistemas não lineares, pequenas mudanças podem ter efeitos dramáticos. O atrator é definido por três equações diferenciais:  $dx/dt = -10x +$



$10y$ ;  $dy/dt = 28x - y - xz$ ;  $dz/dt = -8/3z + xy$ ; onde  $x$ ,  $y$  e  $z$  são variáveis,  $t$  é o tempo e  $d/dt$  é a taxa de variação (Fig. 17).



**Fig. 17: Atrator Estranho – 2.000.000 de iterações** (Do autor)

Sendo estas as principais características da Geometria Fractal que podem ser relacionadas com a arquitetura, observa-se que o estudo dos fractais fornece potencialidades para a arquitetura, devido a sua importância conceitual e qualidade como ferramenta morfológica. Mandelbrot (1998:208) coloca que a Geometria Fractal *“ainda não se tornou acadêmica, mantendo uma diversidade que é intrínseca, rara, diversa e importante”*.

Os fractais fornecem regras para a ordenação do caos e essas regras geram formas que possuem dimensão diferente da estabelecida na Geometria Euclidiana. Segundo Salingaros (2007:39), *“a idéia central dos fractais é a recursividade generativa”*. Sabe-se que não é possível construir essas formas na arquitetura sem uma adaptação. Sendo assim, pode-se utilizar o processo de gerar fractais para o estudo de morfologias arquitetônicas ou vocabulário de formas.

Celani (2003:43) afirma que, *“na natureza, assim como na arquitetura e no design em geral, encontramos diversos exemplos de formas geradas a partir de processos recursivos”*. Todas as características fractais apresentadas são fundamentais para a elaboração do conteúdo pedagógico sobre Arquitetura Fractal. A autossimilaridade, a recursividade e o entendimento das escalas servem para a construção de objetos arquitetônicos fractais dispostos nos próximos capítulos.

### 3 Arquitetura Fractal

#### 3.1 Precedentes da Arquitetura Fractal

*“Nosso ambiente é repleto destes padrões.”* Avi e Rachel Abrams

A Geometria Euclidiana ajudou a compor a forma arquitetônica e a paisagem das cidades como são hoje, principalmente por implicar em menor custo de construção. A revolução industrial dá o impulso tecnológico para o surgimento do movimento Modernista na arquitetura, que se vale de princípios reducionistas inerentes à Geometria Euclidiana: formalismo, funcionalismo e racionalismo. A Bauhaus e toda sua produção arquitetônica e teórica representam o auge do movimento Moderno, fazendo a ligação entre a tecnologia construtiva e a arquitetura (DUARTE, 1999:36).

A palavra funcional, devido a seu uso habitual, que procura justificar o partido arquitetônico dos edifícios, passa a identificar um modelo de arquitetura *“de estrutura de concreto e aço, de formato simples e retangular, com revestimento de reboco branco, concreto cinza ou vidro”* (BROADBENT, 2006:143). Essa imagem simples, pura, clara e regular permite definir o recurso geométrico utilizado: a Geometria Euclidiana, eleita por melhor traduzir estes conceitos.

Gleick (1991:110-119) descreve o que o matemático Mandelbrot pensava a respeito da Bauhaus:

*Para Mandelbrot, o epítome<sup>7</sup> da sensibilidade euclidiana fora da matemática era a arquitetura da Bauhaus. Bem poderia ter sido o estilo de pintura melhor exemplificado pelos quadrados coloridos de Josef Albers: depurados, lineares, ordenados, reducionistas, geométricos. [...] Edifícios chamados de geométricos são compostos de formas simples, linhas retas e círculos, descritíveis com apenas alguns números.*

---

<sup>7</sup> Epítome: resumo, compêndio, síntese.

Este trecho mostra um panorama de como a Geometria Euclidiana é marcante nos projetos da arquitetura Moderna. Gleick faz sua interpretação pessoal da palavra ‘geométrico’ ao tentar transpor a expressão das Artes Plásticas para a Arquitetura, pois um edifício geométrico pode ser composto de formas irregulares ou complexas também. A Geometria Euclidiana é fundamental para a representação e construção de objetos arquitetônicos, enquanto que a Geometria Fractal sugere regras compositivas que podem ser traduzidas para a arquitetura através de um número finito de iterações.

O pensamento funcionalista influencia até hoje os arquitetos, como explica Broadbent (2006:143): *“a ética funcionalista [do Modernismo] vem nos acompanhando há tanto tempo que a maioria das pessoas ainda sente que, no fundo, isso é moralmente correto”*. Por outro lado, alguns projetistas, especialmente durante o Pós-modernismo, escapam deste pensamento, procurando uma arquitetura mais complexa. Mandelbrot (1983:24, tradução nossa) aponta a possibilidade de ligações entre a Geometria Fractal e a arquitetura:

*[...] a matemática, a música, a pintura e a arquitetura modernas deveriam estar relacionadas entre si. Mas isso é uma impressão superficial, notadamente no contexto da arquitetura. Uma construção de Mies van der Rohe [Fig. 18] é remetida a uma escala limite euclidiana, enquanto que uma construção do período ápice das Belas Artes é rica em aspectos fractais.*



**Fig. 18: Edifício Seagram – Ludwig Mies van der Rohe (Cadman, 2005)**

Os padrões recursivos e fractais podem ser vistos em diversas culturas e períodos históricos. Edifícios construídos anteriormente ao trabalho de Mandelbrot também têm valores fractais, sendo que a seguir são apresentados alguns exemplos. Em seguida, a pesquisa enfoca obras arquitetônicas contemporâneas fundamentadas em conceitos da Geometria Fractal.

A Torre Eiffel (Fig. 19), construída em 1889, apresenta um padrão fractal identificado por Mandelbrot (*ibid*:131, tradução nossa): “a torre que Gustave Eiffel construiu em Paris deliberadamente incorpora a idéia de uma curva fractal cheia de pontos ramificados”. A estrutura metálica da torre é composta por quatro níveis na forma da letra A, resultando em uma estrutura interconectada por elementos autossimilares repetidos em escalas decrescentes.

Gleick (1991), ao explicar o Triângulo de Sierpinski e sua propriedade singular, diz que qualquer ponto arbitrário é um ponto de bifurcação (uma forquilha na estrutura), e que fica fácil imaginar isso ao pensar na Torre Eiffel. “Eiffel, é claro, não podia levar essa disposição ao infinito, mas compreendeu o sutil aspecto de engenharia que lhe permitia tirar peso sem retirar também força estrutural (*ibid*:95)”.



**Fig. 19: Torre Eiffel – Gustave Eiffel (Wölk, 2006)**

Construções de décadas e séculos anteriores que apresentam estrutura fractal podem ser citadas, tais como castelos medievais, igrejas barrocas, igrejas góticas, cidades africanas, templos hindus e as obras de Antonio Gaudí, Louis Sullivan e Frank Lloyd Wright (OSTWALD, 2001; LORENZ, 2002

e HAGGARD; COOPER; GIOVAY, 2006). São marcos culturais que se destacam na arquitetura. Contudo, na época em que foram construídas, a Geometria Fractal não havia sido conceituada como tal. Enquanto os cientistas pesquisavam a regularidade na natureza, alguns arquitetos incorporavam em suas obras a concepção de irregularidade que predomina na natureza, com padrão iterativo. Trata-se, talvez, de um desejo latente de união do ser humano com a natureza ou, usando palavras contemporâneas, o pensamento fractal pode ser algo inerente ao pensamento humano.

Com os livros ‘Objetos fractais’ e ‘Geometria Fractal da Natureza’, de Mandelbrot, no final da década de 1970, é que se pode considerar o surgimento da Arquitetura Fractal. Como afirma Ostwald (2001, tradução nossa), *“as origens da Arquitetura Fractal consciente não pode ter ocorrido até que a Geometria Fractal fosse formalizada por Benoit Mandelbrot, no final dos anos 70”*.

Eglash (s.d.) apresenta a forma fractal de ornamentos originários da Etiópia até a terceira iteração e o padrão iterativo da arquitetura africana da cidade de Ba-ila, na Zâmbia, conforme figuras 20 e 21. Estas imagens foram elaboradas para o seu livro ‘Fractais Africanos’ e podem ser encontradas e iteradas no seu site (*ibid*).

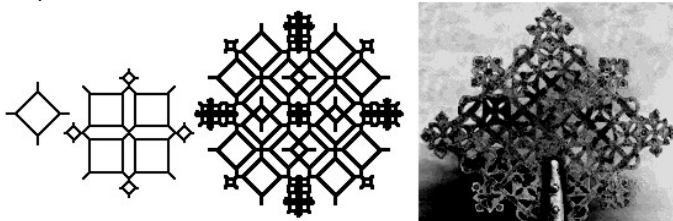


Fig. 20: Ornamentos (Eglash, s.d.)

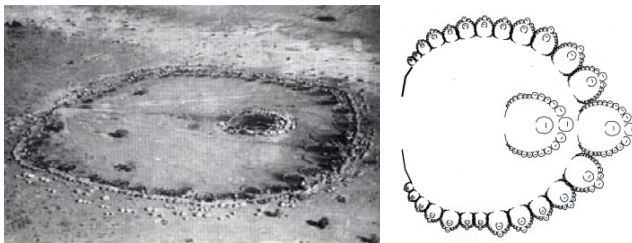
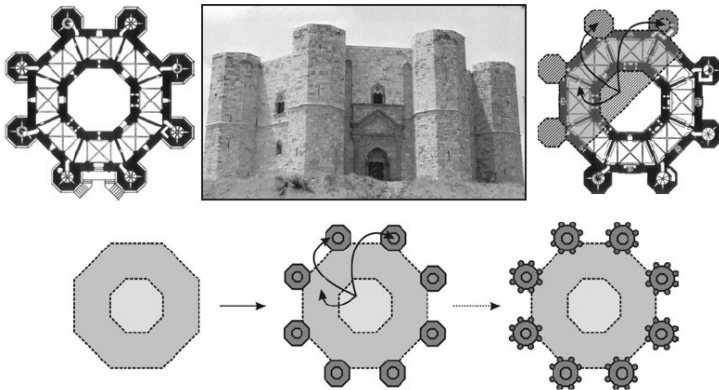
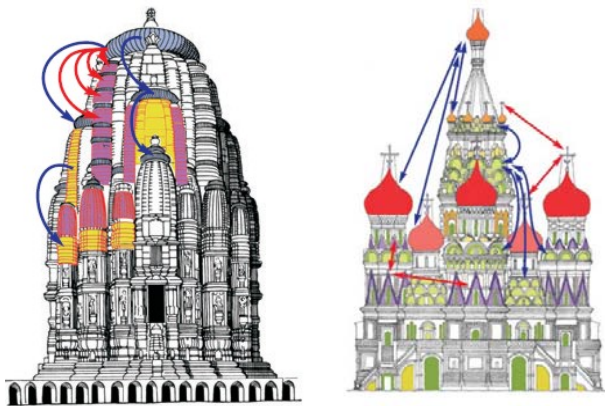


Fig. 21: Ba-ila (Eglash, s.d.)

A figura 22 mostra o Castelo Del Monte, construído no Século XIII, na Itália, e o seu padrão iterativo octogonal. Lorenz (2002) mostra que foram efetuadas três iterações. O Templo Rajarani, do Século XI, representa a construção de grande parte dos templos hindus e seu padrão fractal (fig. 23). A Catedral Pokrov (ou Catedral Santo Basil), do Século XVI, possui autossimilaridade nas suas cúpulas (fig. 24). A Catedral Gótica de Colônia (fig. 25, p. 46), construída no Século XIII, também segue um padrão de autossimilaridade em diversas escalas. Essas três últimas construções diminuem na parte superior também por uma questão estrutural.

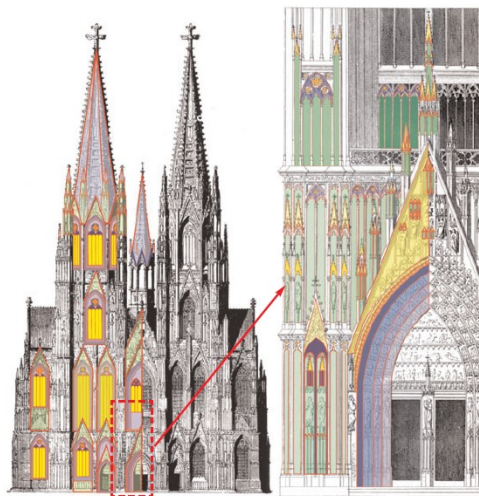


**Fig. 22: Castelo Del Monte** (Lorenz, 2002:67)



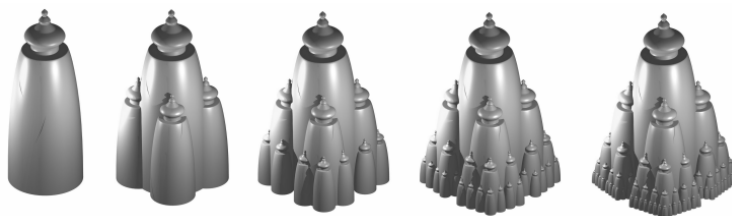
**Fig. 23: Templo Hindu Rajarani** (Lorenz, 2002:69)

**Fig. 24: Catedral Pokrov** (Lorenz, 2002:69)



**Fig. 25: Catedral Gótica de Colônia** (Lorenz, 2002:70)

Joye (2007) explica a relação dos templos hindus com a composição fractal (Fig. 26.), pois a estrutura dos templos é entendida como um modelo do universo, uma concepção ligada diretamente à autossimilaridade dos fractais.



**Fig. 26: Geração fractal de templo hindu** (Joye, 2007:315)

A característica iterativa dos fractais é utilizada pelo ser humano ao longo da história, principalmente para contemplar em suas obras a complexidade inerente à natureza. Para Salingaros (2007:38), “*formas complexas surgem do processo guiado por crescimento fractal através da emergência, adaptação e auto-organização*”. Pode-se afirmar que esses padrões e regras são usados na arquitetura há muito tempo, para criar ritmos ou simetrias. E também produzir a ideia de unidade do conjunto. Projetar com fractais é uma característica da arquitetura contemporânea, como pode ser visto a seguir.



### 3.2 Arquitetura e Forma Fractal

*“O espaço pós-moderno - ambíguo, fragmentado e eternamente mutante.”* Charles Jencks

O purismo funcional não representa o anseio de usuários e arquitetos no período Pós-modernista (década de 1980 em diante). A arquitetura pós-moderna caracteriza-se pelo seu pluralismo e diversidade de forma e expressão. É marcada também pelo abandono do estilo internacional da arquitetura moderna. Novas tendências arquitetônicas surgiram nos anos 90. Jencks (2002:51) considera oito movimentos, divididos em: Simbolismo Cósmico, Ecletismo Pós-moderno, *Datascares* (paisagens de dados), Heterópolis, Significado Enigmático, Arquitetura Fractal, Biomórfica e Cibernética.



**Fig. 27: Museu Guggenheim Bilbao – Frank Gehry (Reeve, 2005)**

As formas da Arquitetura Pós-moderna agregam valores de outras ciências, especialmente da ecologia, e possuem caráter monumental, principalmente com o uso da tecnologia avançada. Um exemplo é o Museu Guggenheim (Fig. 27). Essas novas e diversas tendências coincidem com o momento da história da matemática em que é criada a Geometria Fractal, uma linguagem formal para descrever a complexidade, tanto na arquitetura como nas ciências contemporâneas. Em 1985, o arquiteto Peter Eisenman (1988) projeta para a Terceira Bienal Internacional de Arquitetura de Viena o plano chamado de ‘Setas em Movimento, Eros e Outros Erros’<sup>8</sup> (Fig. 28, p. 48), ou Romeu e Julieta, sendo possível constatar como um projeto arquitetônico

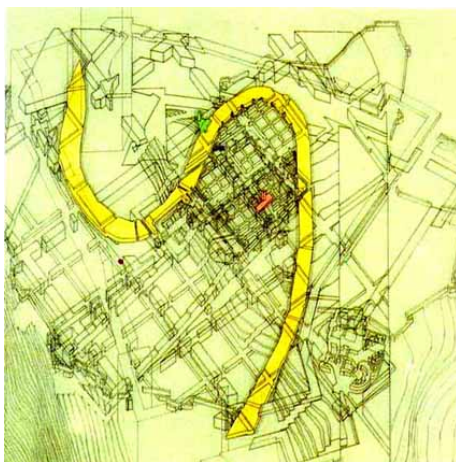
---

<sup>8</sup> Tradução de *Moving Arrows, Eros and Other Errors*



- e neste caso urbanístico - pode adotar conceitos da Geometria Fractal.

Outros projetos de Eisenman que utilizaram a Geometria Fractal são um projeto paisagístico, com a contribuição do filósofo Jacques Derrida, chamado Chora L Works, composto por uma variedade de iterações controladas, e o projeto Casa 11<sup>a</sup>, que usa os conceitos de *scaling*, autossimilaridade e autorreferencialidade (OSTWALD, 2001). Após os projetos de Eisenman outros arquitetos também agregam características fractais nos projetos, alguns buscam a estética, outros focam na complexidade e alguns pesquisam diferentes morfologias.



**Fig. 28: Projeto Romeu e Julieta – Peter Eisenman** (Arquique, s.d.)

A contribuição para as disciplinas de Projeto Arquitetônico e História da Arquitetura é relevante, pois a Geometria Fractal possui conceitos atuais e utilizados por arquitetos contemporâneos. Segundo o ponto de vista de Ostwald (2001), alguns arquitetos usaram o termo e a Teoria Fractal de maneira oportunista, desvirtuando seu sentido original. No entanto, a revisão bibliográfica revelou que a produção de arquitetura de natureza fractal é suficiente para ser explorada e estudada por sua contribuição à morfologia na arquitetura.

A morfologia fractal contribui com a percepção da configuração de objetos arquitetônicos. Segundo Ching (1998:34), forma é um termo amplo que “*pode se referir a uma*

*aparência externa passível de ser reconhecida, como a de uma cadeira ou de um corpo humano que nela senta*". A forma na arquitetura pode ser estudada por meio da geometria. Ainda de acordo com Ching (*ibid*), em projeto de arquitetura, compor é *"a maneira de dispor e coordenar os elementos e partes [...] [para] produzir uma imagem coerente"*.

A Arquitetura Fractal é bastante diversificada. Apesar de ser uma tendência nos projetos, não há uma unidade característica facilmente reconhecível, como, por exemplo, ocorre com a arquitetura moderna. Um motivo para isto ocorrer é a liberdade formal que os fractais fornecem. O estudo a respeito dos fractais e das maneiras encontradas pelos arquitetos de usar esta geometria facilita o reconhecimento desta arquitetura. Jencks (2002:211, tradução nossa) afirma que *"um número suficiente de construções foram finalizadas nos moldes deste paradigma, para se ter uma idéia do seu potencial"*. Por isso, trata-se deste panorama visando a encontrar as possíveis aplicações da Geometria Fractal na arquitetura.

É preciso saber que *"a modelação de objetos ou fenômenos naturais com a Geometria Fractal, é feita considerando uma série de aproximações que dependerão do grau de correção que se pretende nos resultados finais"* (ALVES, 2007:141)". É possível verificar como cada arquiteto decidiu usar toda a gama de funcionalidades dos fractais para a criação de formas. A seguir estão elencados quais projetos são concebidos a partir dos fractais para, em seguida, entender os principais modelos de Arquitetura Fractal já trabalhados.

### 3.2.1 Projetos e Arquitetos

Identificar visualmente os projetos e edifícios construídos que se apropriaram dos fractais em sua forma, volumetria, elementos compositivos ou conceituação é uma maneira de conhecer como cada arquiteto trabalhou com estes conceitos. Jencks (2002:211, tradução nossa) explica que muitos arquitetos alinham seus trabalhos com a Teoria da Complexidade,

*entre as mais importantes estão o Aronoff Center, de Peter Eisenman,*

*Museu Judaico de Daniel Libeskind e o Museu de Bilbao, de Frank Gehry. Há também construções menos divulgadas de Rem Koolhaas, Zaha Hadid, Morphosis, Enric Miralles, Coop Himmelblau, Ben van Berkel, Shoei Yoh, FOA, Zvi Hecker, os grupos ARM, Oosterhuis e Spuybroek e Ushida Findlay. Além destes há aqueles na cúspide do novo paradigma, aqueles comprometidos como parte do programa. Entre os mais notáveis estão Kisho Kurokawa, Will Alsop, Renzo Piano, Santiago Calatrava, Ken Yeang e Nick Grimshaw. E finalmente há o trabalho teórico de Greg Lynn, Jeff Kipnis, Neil Denari, Reiser e Umemoto, bem como a pesquisa na nova teoria do urbanismo como vemos, a cidade Fractal, de Batty, Longley e Graham Shane.*

Charles Jencks (*ibid*:236-259) expõe a obra de alguns arquitetos que criaram edifícios com composição fractal no livro 'O Novo Paradigma em Arquitetura', no capítulo 'Arquitetura Fractal':

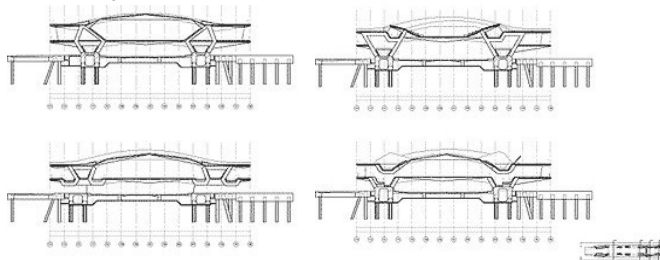
1. Enric Miralles, Edifício Eurhythmics Center, em Alicante – Espanha. Usa a seção cinemática<sup>9</sup> com evolução fractal autossimilar e a ondulação que se mistura ao relevo do local.
2. FOA (*Foreign Office Architects*), escritório dos arquitetos Farshid Moussavi e Alejandro Zaero-Polo, que acumulam experiência profissional ao lado de Rem Koolhaas e Zaha Hadid, ligados à AA School<sup>10</sup>, vencedores do concurso para o Terminal Portuário de Yokohama – Japão (Fig. 29, p 51). A proposta utiliza a seção cinemática e procura

---

<sup>9</sup> Seção cinemática é um método de controlar o projeto de edifícios de grandes escalas.

<sup>10</sup> Será apresentada a importância da AA School nesta pesquisa.

simular a paisagem do lugar sem montanhas e a ondulação do mar por meio de formas autossimilares.



**Fig. 29: Seção Cinemática – FOA (ArcSpace, s.d.)**

3. Zvi Hecker, edifício da Escola Judaica Heinz-Galinski, em Berlim – Alemanha (Fig. 30). A composição fractal apresenta-se de diferentes maneiras através da espiral de formas autossimilares que remetem a um girassol e compõem corredores em forma de serpente, espaços em forma de peixe e escadas irregulares.



**Fig. 30: Escola Heinz-Galinski – Zvi Hecker (Hecker, s.d.)**

4. Coop Himmelblau, edifício do UFA Cinemas, em Dresden – Alemanha (Fig. 31, p. 52). Semelhante a um cristal brilhante, a forma do edifício emerge do solo. A linguagem fractal tem continuidade no interior do prédio. Segundo Jencks (*ibid*:239), a intenção não é criar fractais exatos, mas dar ao edifício uma dinâmica expressiva.

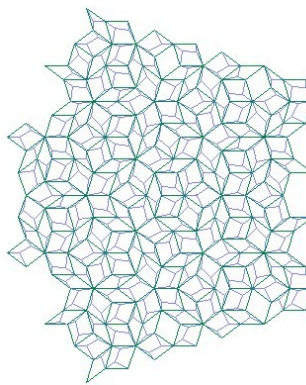


**Fig. 31: UFA Cinemas – Coop Himmelblau (Zugmann, s.d.)**

5. Ashton, Raggatt e McDougall, Edifício Storey Hall, em Melbourne – Austrália (Fig. 32), é um projeto fractal exuberante e colorido, cujas formas são baseadas nos ladrilhos irregulares de Roger Penrose (Fig. 33), que nunca se repetem exatamente e são sempre autossimilares.



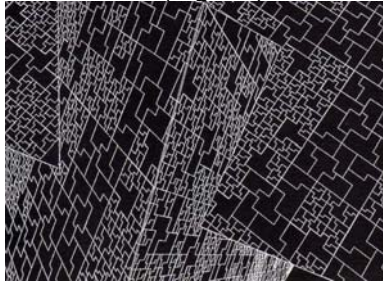
**Fig. 32: Storey Hall – ARM (ARM, s.d.)**



**Fig. 33: Ladrilhos de Penrose (Melik, s.d.)**

6. Daniel Libeskind, edifício do Museu Judaico de Berlim – Alemanha. A arquitetura é formada por fragmentos quebrados, linhas de conexão e ângulos autossimilares. Este projeto é chamado pelo arquiteto de *Between the Lines* (entre as linhas), pois é composto por duas linhas de pensamento, organização e relação: uma reta, porém

fragmentada em muitas partes, e uma tortuosa, mas que continua indefinidamente. Também é de Libeskind o projeto do Museu Victoria e Albert, em Londres – Inglaterra, composto a partir de um atrator caótico em forma de espiral, revestido por peças que ele denomina de ‘fractile’ (ladrilho fractal) de cerâmica (Fig. 34), cuja irregularidade dá um resultado final semelhante a uma superfície cristalizada (Fig. 35).



**Fig. 34: Fractile** (Espanés, 2003:62)



**Fig. 35: Museu Judaico – Daniel Libeskind** (Libeskind, s.d.)

7. Tom Mayne e Morphosis, edifícios da Escola Diamond Ranch, em Pomona – EUA. Os arquitetos criam formas fractais simples que refletem o terreno e também as montanhas distantes.
8. Frank Gehry, diversos edifícios, entre os quais se destaca o Museu Guggenheim em Bilbao – Espanha. Jencks chama de fractais fluídos as superfícies que são

semelhantes a formas naturais: escamas de peixe, pele de serpente, disposição de penas em aves.

Baier e Sedrez (2001) identificam Kisho Kurokawa pela obra Museu de Fukui, em Fukui – Japão, onde o próprio arquiteto explica a sinuosidade do edifício inspirada em uma curva fractal (KUROKAWA, 2001), além de outros projetos que utilizam o conceito da simbiose da arquitetura com a natureza (fig. 36). Espanés (2003) encontra relações fractais em projetos dos arquitetos Reima Pietilä, Steven Holl, Ferrater, Canosa e Figueras e Daniel Libeskind.



**Fig. 36: Museu Fukui – Kisho Kurokawa** (Kurokawa, 2001:77)

Ostwald (2001) afirma que outros arquitetos e escritórios passam a utilizar as características fractais em seus projetos após Peter Eisenman: Asymptote, Charles Correa, Carlos Ferrater, Arata Isozaki, Christoph Langhof, Daniel B. H. Liebermann, Fumihiko Maki, Eric Owen Moss, Jean Nouvell, Philippe Samyn, Kazuo Shinohara, Aldo e Hannie van Eyck, Ben van Berkel e Caroline Bos, Peter Kulka e Ulrich Königs e Eisaku Ushida e Kathryn Findlay.

O escritório Lab Architecture Studio (s.d.) utiliza fractais no projeto *Federation Square*, de 1997, na cidade de Melbourne, Austrália (Fig. 37, 38, 39, p. 58). As fachadas recebem um revestimento composto por zinco, vidro e uma pedra chamada de *sandstone*, em formato de triângulo, compondo cinco peças que



constroem um painel. Um megapainel é formado por cinco painéis. O resultado é uma fachada dinâmica e a distribuição dos edifícios também se dá, então, de maneira fractal.



**Fig. 37: Externa Federation Square – LAB** (Federation Square, s.d.)



**Fig. 38: Detalhe Federation Square – LAB** (Federation Square, s.d.)



**Fig. 39: Interna Federation Square – LAB** (Federation Square, s.d.)

O arquiteto Miguel Chevalier (2006) propõe, no ano de 2000, um elemento escultórico para uma praça chamado de

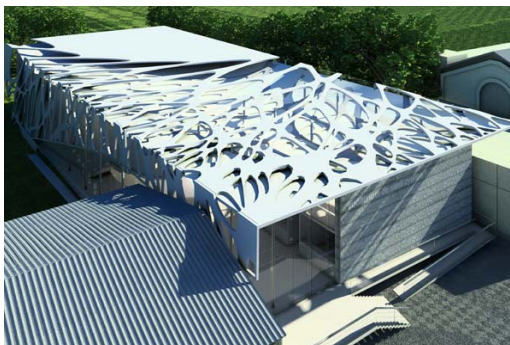


Nuvem Fractal (Fig. 40). É uma escultura monumental criada para a área de Marselha, na França, medindo vinte metros por vinte e oito metros. A obra tem a forma de uma superestrutura flutuante formada por uma rede de cabos de fibra ótica disposta em crescimento fractal.

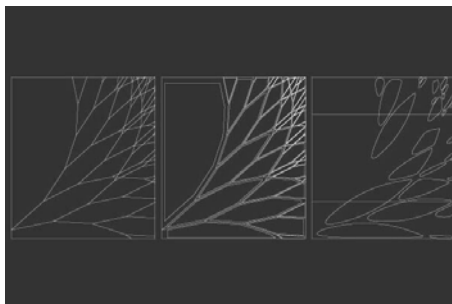


**Fig. 40: Nuvem fractal – Miguel Chevalier** (Chevalier, 2006)

O escritório Serero (2007) projeta o auditório Saint Cyprien, na França (Fig. 41), usando uma árvore de crescimento fractal na fachada. O projeto inicia com uma série de experimentações de formas *L-systems* com diferentes ângulos, buscando silhuetas de folhas e sombras (Fig. 42, p. 57). A complexidade do exterior se reflete no interior, com o objetivo de melhorar a qualidade acústica do auditório. Além disso, consegue um sistema de ventilação passiva. A casca vazada cria um jogo de luz e sombra onde a cobertura abaixo é transparente. Esse escritório projeta diversos edifícios com inspiração em formas naturais e usa a Geometria Fractal para tornar possível a construção.



**Fig. 41: Maquete do Auditório Saint Cyprien - Serero** (Serero, 2007)



**Fig. 42: Projeto Saint Cyprien - Serero (Serero, 2007)**

Nas Indústrias Hus (Fig. 43, 44), o projeto do escritório MAPT (2008) utiliza o crescimento em árvore (*L-system*) para o desenho da estrutura do edifício. A proposta incorpora um conjunto de edificações existentes e valoriza a transparência da edificação, buscando a sensação de caminhar na copa de uma árvore.

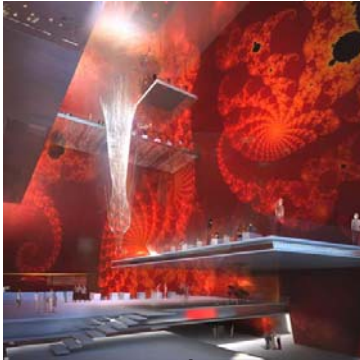


**Fig. 43: Estrutura da Indústria Hus - MAPT (MAPT, 2008)**



**Fig. 44: Maquete digital da Indústria Hus - MAPT (MAPT, 2008)**

O projeto da Torre Signal, de Jean Nouvel, vencedor do concurso *Torre Signal La Defense* (Fig. 45, 46), reúne escritórios, apartamentos, espaços culturais e hotel em um único edifício sustentável. Grandes cortes na fachada do prédio formam átrios abertos cujas paredes são decoradas com fractais não lineares que podem ser vistos à longa distância no centro de Paris.



**Fig. 45: Átrio Fractal – Jean Nouvell (Nouvel, s.d.)**

**Fig. 46: Maquete Torre Signal – Jean Nouvell (Nouvel, s.d.)**

A proposta de Steven Holl (2003) para o Centro de Visitantes de Loiseum, na Áustria (Fig. 47), tem como programa arquitetônico uma vinícola, um hotel com restaurante e espaços para conferências. O edifício tem acesso aos espaços subterrâneos de armazenamento do vinho. Este é um sítio histórico e possui mais de novecentos anos de idade. O arquiteto fragmenta um cubo pela subtração de elementos e diferenciações no acabamento externo.



**Fig. 47: Centro de Visitantes de Loiseum – Steven Holl (Holl, 2003)**

O projeto Bankside Paramorph (Fig. 48), do escritório dECOi (JODIDIO, 2007), é a reforma da cobertura de um edifício comercial. Os arquitetos usam alta tecnologia para reduzir o peso da construção e para reduzir o custo da obra. A forma se assemelha a uma concha e usa Geometria Fractal para produzir um objeto que se aproxima de formas naturais.



**Fig. 48: Projeto Bankside – dECOi** (Jodidio, 2007:96).

O Museu de Arte Islâmico (Fig. 49), projetado pelo arquiteto I. M. Pei, é uma obra repleta de fractais. A pirâmide externa segue o processo de subtração utilizado no fractal Escada do Diabo. Internamente, a ornamentação também tem padrões fractais. Este edifício, no entanto, tem características das construções locais, o que o torna ao mesmo tempo contemporâneo e símbolo de uma cultura muito singular. A escala monumental é compreensível, pois a intenção é criar um marco cultural.



**Fig. 49: Museu Islâmico Vista Externa – I. M. Pei** (MIA, s.d.)

As propostas do arquiteto Marc Fornes (2008) são relevantes por sua configuração fractal. Por meio de *scripts*

computacionais ele gera formas com crescimento recursivo (Fig. 50).

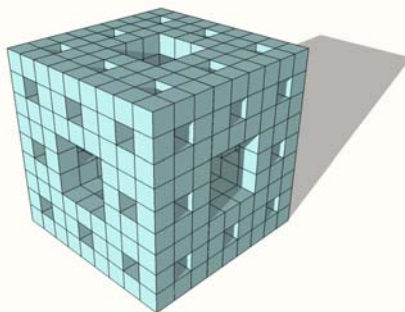


**Fig. 50: Crescimento recursivo – Marc Fornes (Fornes, 2008)**

O *designer* Takeshi Miyakawa desenha o Gaveteiro Fractal 23 (Fig. 51), que segue a ideia desenvolvida no fractal Esponja de Menger (Fig. 52), que é o Tapete de Sierpinski aplicado em três dimensões. A proposta aperfeiçoa a utilização de um cubo, dividindo as gavetas em um processo fractal.



**Fig. 51: Gaveteiro Fractal 23 - Takeshi Miyakawa (Miyakawa, 2008)**



**Fig. 52: Esponja de Menger com 2 iterações (Do autor)**

A Mesa Arborism, do escritório Nosigner (Fig. 53), possui pés que seguem o crescimento fractal em árvore (*L-system*) que sustenta a ideia de utilizar objetos cujo desenho siga uma lógica da natureza. A Mesa Fractal do escritório Platform Wertel Oberfell (Fig. 54) usa o padrão fractal de crescimento na natureza. O objeto é produzido com o auxílio de prototipagem rápida.



**Fig. 53: Mesa Arborism – Nosigner** (Nosigner, s.d.)

**Fig. 54: Mesa Fractal – Platform Wertel Oberfell** (Platform, s.d.)

As maneiras de utilizar a Geometria Fractal na arquitetura e no *design* são múltiplas. A adição e subtração de elementos é um processo morfológico muito utilizado pelos projetistas que incorporam no trabalho os fractais. Pode-se ressaltar que a Geometria Fractal fornece alternativas para o processo, especialmente por se ajustar automaticamente à tecnologia. Na página 63, o Quadro 1 apresenta cronologicamente os principais projetos de Arquitetura Fractal. Os projetos foram selecionados, pois apontam características fractais conforme indicado pelos autores explorados ou pelos próprios arquitetos. Contemplar o panorama da Arquitetura Fractal possibilita a compreensão de como é elaborada a relação dessa geometria com a arquitetura e quais as potencialidades desta ferramenta.



## Quadro 1: Quadro Cronológico da Arquitetura Fractal Contemporânea (Do autor)

ANO	ARQUITETO OU ESCRITÓRIO	PROJETO	LOCAL	DATA DE INÍCIO E CONCLUSÃO
1978	Peter Eisenman:	Moving Arrows, Eros and Other Errors	Áustria	1985
1988	Daniel Libeskind:	Museu Judaico de Berlim	Alemanha	1989 a 1999
	Enric Miralles:	Eurhythms	Espanha	1990 a 1991
	Zvi Hecker:	Escola Judaica Heinz-Galinski	Alemanha	1990 a 1995
	Frank Ghery:	Museu Guggenheim Bilbao	Espanha	1991 a 1997
	Renzo Piano:	Centro Jean-Marie Tjibao	Nova Caledônia	1991 a 1998
	Ashton, Raggatt e McDougall:	Storey Hall	Austrália	1992 a 1995
	Kisho Kurokawa:	Museu Fukui	Japão	1993 a 1996
	Coop Himmelblau:	Centro de Cinemas de Dresden	Alemanha	1993 a 1998
	FOA:	Terminal Portuário de Yokohama	Japão	1995 a 2002
	Kisho Kurokawa:	Museu Dinossauro	Japão	1996 a 2000
	Daniel Libeskind:	Extensão Museu Victoria e Albert	Inglaterra	1996 a ...
	Lab Architecture Studio:	Federation Square	Austrália	1997 a 2002
1998	Ashton, Raggatt e McDougall:	Centro Cultural Marion	Estados Unidos	1999 a 2001
	Renzo Piano:	Centro Paul Klee	Suiça	1999 a 2005
	Tom Mayne e Morphosis:	Escola Diamond Ranch	Estados Unidos	1999 a 2000
	Daniel Libeskind:	Museu Denver	Estados Unidos	2000 a 2006
	Miguel Chevalier:	Nuvem Fractal	França	2000 a 2007
	Coop Himmelblau:	Museu das Confluências	França	2000 a 2010
	Zvi Hecker:	Escola e Jardim de Infância	Áustria	2000 a ...
	Steven Holl:	Centro de Visitantes Loisium	Áustria	2001 a 2003
	Daniel Libeskind:	Centro Mídia Criativa	China	2002 a 2011
	PTW:	Cubo d'água	China	2003 a 2008
	dECOi Arquitetos:	Bankside	Londres	2003 a 2004
	Jean Nouvell:	Torre Ponto Focal	Líbano	2004 a ...
	Lab Architecture Studio:	SOHO Shangdu	China	2004 a 2007
	Rojkind Arquitectos:	Concurso Absolute City Centre	Canadá	2005 a 2006
	J. Mayer H.:	Cafeteria e Galeria	Dinamarca	2005 a 2007
	Plasma Studio:	Hotel Puerta America	Espanha	2005
	Giancarlo Mazzanti:	Biblioteca Parque	Colômbia	2005
	Mozas Aguirre:	Central do Banco Vital	Espanha	2005 a 2007
	AA School, Simon Whittle:	Pavilhão Temporário	Inglaterra	2006 a 2006
	RUR:	Torre O 14	Emirados Árabes	2006 a 2008
	Steven Holl:	Vanke Center	China	2006 a 2009
	Marks Barfield:	Proposta Pavilhão Britânico em Shangai	China	2007
	Nosigner:	Mesa Arborism		2007
	Thomas Heatherwick:	Cafeteria East Beach	Inglaterra	2007
	Rojkind Arquitectos:	Museu Nestlé	México	2007 a 2007
	Zaha Hadid:	Torre Inovação	China	2007 a 2011
	MAPT:	Indústrias Hus	Dinamarca	2007 a 2008
	Serero:	Auditório Saint Cyprien	França	2007 a ...
	Pascal Arquitectos:	Shopping Pedregal	México	2007 a ...
2008	AA School, Alan Dempsey e Alvin Huang:	Pavilhão 2008	Inglaterra	2008 a 2008
	Zaha Hadid:	Museu Eli e Edythe	Estados Unidos	2008
	Alison Brooks:	Prédio Tribeca	Inglaterra	2008 a ...
	Gage e Clemenceau:	Lustre Flat		2008
	Gage e Clemenceau:	Biblioteca Nacional	República Tcheca	2008
	Gage e Clemenceau:	Centro de Artes Performativas	Coreia do Sul	2008
	Plataform Wertel Oberfell:	Mesa Fractal		2008
	Takeshi Miyakawa:	Cadeira Family		2008
	Takeshi Miyakawa:	Gaveteiro Fractal 23		2008
	Jean Nouvell:	Proposta Torre Signal	França	2008
	OMA:	Proposta Torre Signal	França	2008
	Theis e Kahn:	Reforma Igreja Lumen	Inglaterra	2008
	I. M. Pei:	Museu de Arte Islâmica	Qatar	... a 2008

### 3.2.2 Modelos de Forma Fractal

Seguindo os princípios de Munari (1997:69), o suporte para se transmitir uma informação (mensagem) em arquitetura utiliza os seguintes aspectos: 1) Textura, 2) Forma, 3) Estrutura, 4) Módulo, 5) Movimento. As formas orgânicas são irregulares, porém não são desprovidas de padrões. A dimensão fractal é capaz de mensurar os padrões naturais e irregulares, pois é capaz de atingir a similaridade das formas infinitamente.

Para o arquiteto que pretende utilizar regras fractais, o computador pode contribuir como facilitador, pois torna ágeis cálculos e iterações. A construção de fractais lineares através de ferramentas computacionais permite a observação das escalas. É claro que o processo de criação de arquitetura exige muitos esboços e croquis, até que se alcance o objetivo esperado. O processo manual é fundamental no exercício da arquitetura, pois envolve aspectos como a habilidade, inteligência visual e motricidade. E no processo digital, as maquetes são dinâmicas, auxiliando o desenvolvimento da visão espacial. Este tipo de visualização é de extrema importância a estudantes de arquitetura em fases iniciais. A prática da visão em três dimensões auxilia o desenvolvimento de seus projetos.

Para conhecer a Geometria Fractal, estudam-se as formas que apresentam um sistema subdividido infinitamente e que é similar. Como define Bovill (1996), as formas revelam o mesmo padrão nos detalhes ampliados. Formas naturais como folhas, árvores, relevo, flores, minerais, padrões de ondas e células apresentam essa progressão de formas similares. Na arquitetura, podem-se considerar válidos os processos generativos e recursivos, além da atribuição da escala, provindos dos fractais.

O processo de concepção de formas pode ser entendido como um sistema de seleção e escolhas. Ao trabalhar a Geometria Fractal, o aluno pode lidar com o uso de formas dinâmicas. Assim, primeiro ele define um vocabulário de formas e depois uma gramática. Concluídas as operações, ele pode alterar o vocabulário ou a gramática. É o que Clark e Pause (1997:187) chamam de "*idéias generativas*", pois é uma maneira de organizar e gerar conscientemente uma forma.



Deve-se lembrar que não é possível a utilização literal das características fractais na arquitetura. Yessios (1987, tradução nossa) afirma que “*um processo fractal, se ficar sem restrições, continua infinitamente. Além disso, se aplicado de uma maneira pura, irá criar uma forma interessante, mas jamais irá produzir um edifício*”. Neste ponto, é onde aparece a criatividade individual para selecionar e organizar as formas esteticamente e de maneira que produza arquitetura.

Existem algumas aplicações da Geometria Fractal na arquitetura, que podem ser agrupados em três modelos:

1. modelos conceituais, que usam conceitos da Geometria Fractal como elemento norteador das teorias: Eisenman (1988); Salingeros (2001a, 2001b, 2005); Haggard, Cooper e Gyovai (2006);
2. modelos geométrico-matemáticos, que usam o método de contagem de quadrados para calcular a dimensão fractal: Bovill (1996); Sala (2000); Lorenz (2002); Capo (2004); e que usam cálculos computacionais para simulação de volumetrias: Çagdas, Gözubuyuk e Ediz (2005) e Vyzantiadou, Avdelas e Zafiropoulos (2007);
3. modelos geométrico-intuitivos, que usam as regras generativas da Geometria Fractal como inspiração criativa para formas: Espanés (2003); *Architectural Association School of Architecture* (KNUTT, 2006).

Celani (2003) utiliza os fractais para o ensino de CAD e criatividade. As formas recursivas são geradas para criar composições dinâmicas com *viewports* no AutoCAD. Todos os modelos acima citados têm importância para a compreensão da Arquitetura Fractal.

## Dos modelos conceituais

Peter Eisenman

Eisenman cria um projeto (“Setas em Movimento, Eros e Outros Erros”<sup>11</sup>), baseando-se na filosofia desconstrutivista de Jacques Derrida, que aplica o método chamado por ele de Escalante<sup>12</sup>, que consiste em três conceitos: descontinuidade,

---

<sup>11</sup> Tradução de *Moving Arrows, Eros and Other Erros*.

<sup>12</sup> Tradução de *Scaling*.

recursividade e autossimilaridade. Estes conceitos são mutuamente dependentes da escala. O arquiteto explica resumidamente: *“descontinuidade, que confronta a metafísica da presença; recursividade, que confronta a origem, e autossimilaridade, que confronta a representação e a estética do objeto”* (EISENMAN, 1988:70, tradução nossa). O projeto elabora uma intervenção na cidade de Verona para apresentar a história de Romeu e Julieta.

Nikos Salingaros

Salingaros (2007) atribui aos fractais um potencial que pode ser utilizado na arquitetura por meio da recursividade e suas conexões internas. Em ‘Princípios de Estrutura Urbana’ (2001a), Salingaros explica três princípios ordenadores dos projetos fractais: nódulos, conexões e hierarquia. Em ‘Fractais na Nova Arquitetura’ (2001b), o autor segue os preceitos de Christopher Alexander e apresenta as similaridades fractais na arquitetura vernacular. No texto ‘Conectando a Cidade Fractal’ (2005), o autor analisa as propriedades fractais nas cidades.

E na entrevista com o tema Ecologia e o Pensamento Fractal na Nova Arquitetura, Salingaros (2000) explica essa nova relação. Salingaros (2007:40, tradução nossa) coloca que, para uma arquitetura ser considerada fractal na perspectiva de um matemático, é preciso evidenciar uma forma que apresente os conceitos essenciais de autossimilaridade, auto-organização, estrutura fractal e emergência (surgimento de formas). As propostas de Salingaros são perfeitamente aplicáveis em estudos urbanísticos e da paisagem. Sedrez, Pereira e Santiago (2008) utilizam essas ideias em um estudo prático chamado de Paisagem Fractal, fazendo uma análise das conexões e nódulos existentes nas cidades. Para este estudo foi considerada a menor escala em uma cidade, que é a escala humana, segundo Salingaros, para uma proposta que valorize a circulação do pedestre.

Haggard, Cooper e Gyovai

Haggard, Cooper e Gyovai (2006) utilizam os princípios fractais para criar projetos sustentáveis. Os autores desenvolvem um trabalho de pesquisa sobre um modelo de desenho de arquitetura sustentável, partindo da concepção fractal do mundo. *“Arquitetura, para a era da sustentabilidade, deve celebrar, em*

vez de ignorar sistemas caóticos e complexidade (*ibid*:76, tradução nossa)". Os autores buscam uma relação do edifício com o local implantado, eliminando a abstração modernista e interagindo com o clima, sociedade, cultura e ecologia locais.

O modelo de projeto trabalha em diversas escalas para definir o edifício. Quatro focos, do maior para o menor, orientam o partido: paisagem, vizinhança o edifício e os detalhes. Cada foco desenvolve quatro temas: espaço, definição, articulação e fluxos, que são similares em cada escala (*ibid*:81). Os projetos procuram levar em consideração o local implantado com grande ênfase em sua relação com o mundo em um modelo holístico.

Para os autores, a Geometria Fractal oferece uma contribuição estética para o projeto arquitetônico que está relacionado à natureza. Os fractais são precedidos de harmonia, ordem, simetria e formas fluidas (*ibid*:126), além de estabelecerem a visão em escalas necessárias para desenvolver um projeto sustentável.

### **Dos modelos geométrico-matemáticos**

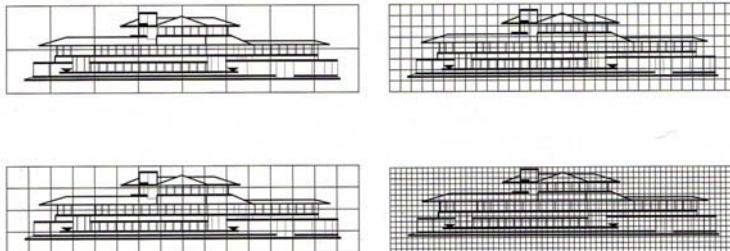
Carl Bovill

Considerada como uma ferramenta matemática por Bovill (1996), a Geometria Fractal tem a função de instrumento para resolver problemas no desenho de projetos, como alternativa à Geometria Euclidiana.

O autor faz observações sobre a simetria na matemática, explicando que a Geometria Fractal é o conjunto de formas infinitas e autossimilares e que a dimensão fractal é a maneira de se medir a textura do objeto. Ele então apresenta o Conjunto de Cantor, alguns fractais lineares e o modelo de contagem de quadrados para calcular valores fractais de edifícios em diferentes escalas. O modelo de contagem de quadrados pode ser usado para verificar a dimensão de qualquer objeto (Fig. 55, p. 67).

A seguir, uma breve explanação do método de contagem de quadrados: uma grelha de quadrados é colocada sobre a imagem (uma fachada ou planta baixa, por exemplo), então os quadrados que contêm uma parte do edifício são marcados e contados. No próximo passo, uma grelha de quadrados menor é escolhida e novamente os quadrados que contêm uma parte da

construção são marcados. Finalmente, a contagem é comparada nas diferentes escalas escolhidas e calcula-se a dimensão fractal. O objetivo deste processo é verificar se o número de detalhes aumenta conforme diminui a escala.



**Fig. 55: Contagem de quadrados da Casa Robie (Bovill, 1996:122)**

Este modelo é usado para determinar a dimensão fractal de uma imagem bidimensional. Resumindo, os passos são: sobrepor a imagem com uma grelha de quadrados, contar o número de quadrados que possuem algo da imagem, dividir os quadrados em quatro partes iguais e contar os que possuem algo da imagem. A dimensão fractal da Casa Robie é na primeira contagem 1,645, na segunda contagem 1,485 e, na terceira contagem, 1,441, calculadas usando a seguinte fórmula:

$$D = [\text{Log}(B) - \text{Log}(A)] / [\text{Log}(Z) - \text{Log}(X)]$$

A= número de quadrados que possuem algo da imagem na primeira contagem

B= número de quadrados que possuem algo da imagem na segunda contagem

X= número de quadrados iniciais

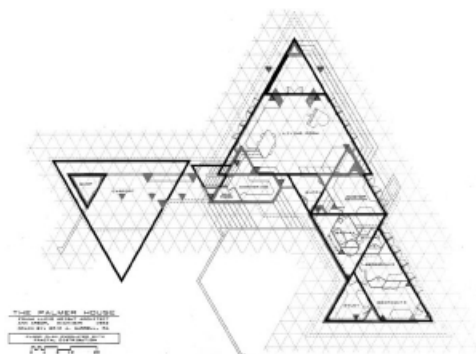
Z= quatro vezes o número de quadrados iniciais

O método serve como ferramenta analítica para medir a dimensão fractal, percebendo as fachadas ou plantas dos edifícios como figuras isoladas e planas. Bovill (*ibid*) entende que a composição arquitetônica deve manter o interesse do observador para que ele perceba detalhes menores cada vez que se aproxima do edifício. Segundo Bovill (*ibid*), existem dois conceitos fractais que podem ser usados na arquitetura: a dimensão fractal que pode ser medida e usada como ferramenta

crítica, e a distribuição fractal que pode ser usada para gerar ritmos complexos a serem usados no projeto.

Nicoletta Sala

Sala (2000) investiga os conceitos elaborados por Bovill, mantém o método de contagem de quadrados e acrescenta uma breve busca a respeito da autossimilaridade nas construções. Sala faz uma análise da autossimilaridade de edifícios construídos antes da criação da Geometria Fractal, como a Catedral de Anagni, Palácio Ca' d'Oro, Castelo Del Monte, Templos Hindus e na planta da Casa Palmer, de Frank Lloyd Wright (Fig. 56).



**Fig. 56: Casa Palmer – Frank L. Wright (Sala, 2000)**

Daniele Capo

Capo (2004) também usa o método de contagem de quadrados para uma averiguação da fractalidade de colunas dóricas e coríntias, para entender a ordem na arquitetura.

Wolfgang Lorenz

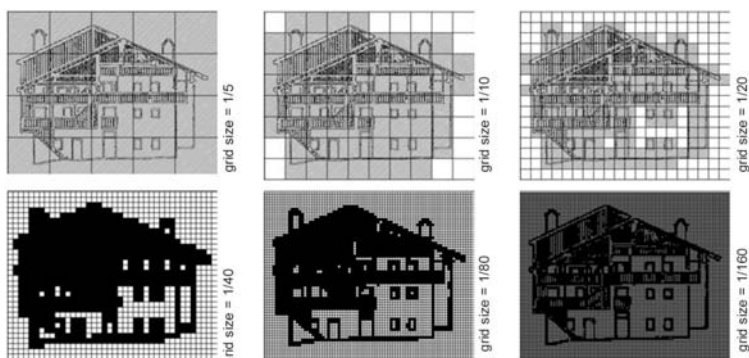
Lorenz (2002) apresenta um histórico da arquitetura, desde a Idade Média até os dias atuais, que tenham conceitos fractais. Ele explica o método de contagem de quadrados de Bovill, que serve para medir a dimensão fractal de edifícios. O autor faz relações entre as dimensões encontradas em diferentes exemplos, buscando um desenho que se aproxime mais de um fractal matemático. Para Lorenz (*ibid*:10 tradução nossa), na arquitetura as *“fachadas podem apresentar algum tipo de*

*irregularidade*”. Essa é uma forma de explorar um dos conceitos fractais na arquitetura.

Lorenz aplica o método de contagem de quadrados em residências rurais com certo padrão, para verificar e comparar suas dimensões fractais. Por exemplo: um edifício gótico tem uma dimensão fractal maior que um edifício moderno. O autor faz a contagem dos quadrados manualmente e através do *software* ‘Benoit’. As figuras 57 e 58 mostram o processo aplicado a uma residência. A contagem manual de quadrados chegou às dimensões fractais: 1,722, 1,656, 1,726, 1,702 e 1,641. A dimensão fractal se mantém alta e isso deriva do fato de que cada escala tem seus próprios detalhes (*ibid*:102). Lorenz (*ibid*) ainda cita as ferramentas de ajuda nas etapas iniciais de projeto, através de camadas com grelhas e possíveis distribuições: o deslocamento do ponto médio, ritmos fractais, IFS e, por fim, os fractais lineares e não lineares.



**Fig. 57: Casa em Borca** (Lorenz, 2000:129)



**Fig. 58: Contagem de quadrados - Casa em Borca** (Lorenz, 2000:101)

Gulen Çağdas, Gaye Gözubuyuk e Ozgur Ediz

Çagdas, Gözubuyuk e Ediz (2005) elaboram um modelo de projeto arquitetônico por computador por meio de um *software* que pode ser entendido como uma gramática de formas. Em uma primeira etapa, a dimensão fractal do terreno é calculada sob diversos aspectos. Em uma segunda etapa, estes dados do local são informados ao *software* para extrair uma proposta de Arquitetura Fractal. O próprio *software* produz alternativas para novas construções, sem muita interferência do projetista.

Para o exemplo abaixo, os autores utilizam a forma inicial de um cubo (Fig. 59, 60, p. 71). O processo generativo inicia locando o cubo e aplicando a dimensão fractal. Cria-se, então, os blocos de cubos com dimensões que variam de 1,0 a 1,9. Conforme a dimensão fractal aumenta, o objeto adquire maior complexidade. O processo generativo descreve como derivar uma composição de uma forma inicial mudando sua dimensão fractal.

O modelo é de um gerador de forma tridimensional baseado na dimensão fractal, usado com o objetivo de capturar o padrão apropriado na configuração da composição da linguagem arquitetônica histórica e gerar novas formas que irão garantir a continuidade dessa linguagem. A dimensão fractal é calculada pelo método de contagem de quadrados, na vizinhança, nas fachadas e no terreno, para que esses valores sejam selecionados posteriormente pelo projetista. *“Sistemas de design de computador podem gerar diferentes imagens durante o processo inicial de projeto e prover inputs úteis quando se procura por formas alternativas de objetos arquitetônicos (ÇAGDAS; EDİZ, 2004, tradução nossa)”*.



**Fig. 59: Formas alternativas – dim.: 1.0, 1.1 e 1.2 (Çagdas e Ediz, 2004)**

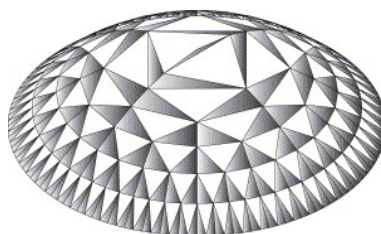


**Fig. 60: Formas alternativas – dim.: 1.5, 1.6 e 1.7** (Çagdas e Ediz, 2004)

A proposta dos autores é: dar suporte à criatividade dos projetistas nas fases iniciais; gerar e dar um conjunto preliminar de formas alternativas; explorar o potencial da tecnologia de *design* digital no processo de projeto arquitetônico.

M. A. Vyzantiadou, A. V. Avdelas e S. Zafiropoulos

O modelo de Vyzantiadou, Avdelas e Zafiropoulos (2007) investiga sistemas estruturais com base em funções geométricas fractais. Por meio de linguagem computacional, os autores geram objetos tridimensionais de conchas ou cascas para cobertura de espaços. Esse objeto pode ser exportado para um sistema CAD e simular coberturas de aço e vidro (Fig. 61). Segundos os pesquisadores, “*a tecnologia moderna de construção suporta tais aplicações (ibid, tradução nossa)*”.



**Fig. 61: Domus fractal** (Vyzantiadou, Avdelas e Zafiropoulos, 2007)

Dos modelos geométrico-intuitivos

Architectural Association School of Architecture

O método da A. A. School (KNUTT, 2006) está relacionado com a metodologia de aprendizagem da escola, que agrupa disciplinas através do ensino do mesmo tema. Assim, os alunos têm aulas de desenho assistido por computador, cálculo matemático, arquitetura (composição) e maquetaria envolvendo



Geometria Fractal. O resultado desta interdisciplinaridade é uma instalação criada pela turma, onde cada aluno desempenha uma função de acordo com sua habilidade natural. O trabalho em grupo simula a atividade de um escritório de arquitetura.

Geralmente, o tema proposto por uma questão de tempo e espaço é um pequeno pavilhão, que possa ser projetado e explorado durante o curso. Knutt (2006) explica que a escola prefere pavilhões, pois oferecem um *briefing* que é leve no contexto e programa, além de permitir concentrar na tecnologia e em como estruturar o espaço. A disciplina é estruturada como uma competição. Na primeira etapa o aluno é solicitado a produzir vinte e cinco ideias em vinte e cinco dias. Da primeira etapa seleciona-se apenas uma ideia, ou um dia de trabalho, formando o que Renzo Piano (*ibid*) chamaria de DNA da construção. Os estudantes passam a segunda etapa fazendo o trabalho individual, desenvolvendo suas próprias ideias para os pavilhões, e então um júri seleciona o desenho vencedor.

Uma lista de leituras acontece paralelamente aos *workshops*, habilitando os estudantes a pensarem sobre as implicações das ferramentas contemporâneas de Tecnologia de Informação no processo de projeto, e colocam o processo de mecanização e os efeitos da tecnologia em um contexto histórico. Uma das leituras sobre autossimilaridade e Geometria Fractal influenciou o projeto de Simon Whittle que foi construído pela turma (Fig. 62). Os alunos produzem todas as plantas necessárias para a execução do projeto, e neste exemplo, eles mesmos fazem o trabalho de marcenaria. Em seguida, trabalham em conjunto na montagem do pavilhão.



Fig. 62: Pavilhão 2006 – Simon Whittle. (Ainley, 2006)

O projeto é uma construção de formas autossimilares em diferentes escalas, construídas com encaixes. A proposta também segue o crescimento fractal em árvore, gerando uma estrutura apta a receber uma cobertura. Conclui-se que a influência dos fractais toma rumos diversos, possibilitando uma gama de alternativas para arquitetos. Todos os modelos apresentados possuem características interessantes do ponto de vista da morfologia arquitetônica. Esta pesquisa, no entanto, aprofunda-se no modelo de Espanés que será detalhado a seguir.

Inês M. Espanés

A pesquisa de Espanés (2003:8, tradução nossa) propõe a utilização da Geometria Fractal na composição formal da arquitetura, resultante em um método, que, de acordo com a autora, é a sobreposição de três importantes forças criativas: “*Ordem, Processo e Complexidade*”, que se acredita estarem inseridas em toda realidade. A Geometria Fractal funciona como um mecanismo de união destas três forças.

O método de Espanés (*ibid*:13, tradução nossa) surge de sua pesquisa para elaborar “*pautas de desenho, geométricas e morfológicas, para a aplicação da Geometria Fractal e determinar as relações criativas entre as ideias contidas entre essa nova ordem e as formas arquitetônicas*”. O livro ‘Fractais e Formas Arquitetônicas’ está dividido em três partes: a primeira considera a Geometria Fractal no contexto cultural atual; a segunda explica os princípios básicos da Geometria Fractal, e a terceira propõe um modelo de aplicação dos fractais na arquitetura.

O modelo reformula algumas leis de composição em arquitetura por meio de traçados reguladores. A autora utiliza técnicas de maquetaria, com materiais como madeira e papel, para demonstrar aspectos fractais que produzam arquitetura. Os modelos tridimensionais gerados são parte da investigação a respeito do tema, levados a um número de iterações finito. Para Espanés (*ibid*:96), a ordem pode ser explicada como hierarquia, como relação entre os objetos. No caso dos fractais, a ordem é a disposição de um conjunto de elementos. Assim, usando a ordem complexa da Geometria Fractal, é possível criar uma estrutura, um sistema de relações que, ao serem modificados, geram morfologias arquitetônicas.

O modelo é considerado pela autora como fenomenológico, pois o processo adotado depende da intuição do projetista que ocorre através da experimentação. Neste processo ocorre a seleção das formas, a busca de hierarquias (destacar elementos), busca de equilíbrio e articulação das partes. Apesar de Espanés citar a escala e a seleção de materiais, as propostas apresentadas no livro não contemplam esses itens.

As experiências iniciais, chamadas de experiências compositivas, aplicam os elementos básicos (Fig. 63) geradores de espaço: a linha, o plano e o volume produzidos por fractais. As experiências compositivas foram feitas com o processo fractal de elementos tridimensionais, o processo de adição e subtração fractal, o processo de extrusão de elementos e a criação de estrutura baseada no crescimento de árvores fractais.

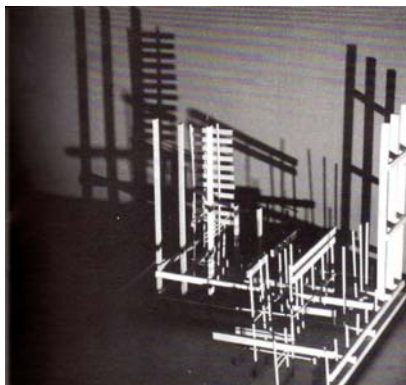


**Fig. 63: Elementos básicos** (Espanés, 2003:123)

Espanés propõe a construção de maquetes partindo de experiências, que denominou de projetuais. As regras para as atividades, que a autora denomina de estratégias, são a seleção de formas, pois *“nenhuma forma, nem as clássicas, nem as modernas, nem as fractais são garantias de beleza* (ESPANÉS, 2003:136)”. Em seguida é feita a reelaboração do esquema, selecionando elementos e recriando oposições. Trabalham-se, então, as hierarquias, elegendo quais elementos são dominantes e quais são subjacentes. Parte-se para a qualificação, onde se selecionam as qualidades dos materiais, aberturas, opacidades, transparências, texturas e cores. A autora cita a interação com a escala, apesar da maioria dos exemplos deixarem apenas subentendida a figura humana. As regras finais são a busca de equilíbrio na composição, busca de síntese dos elementos importantes e articulação entre as partes.

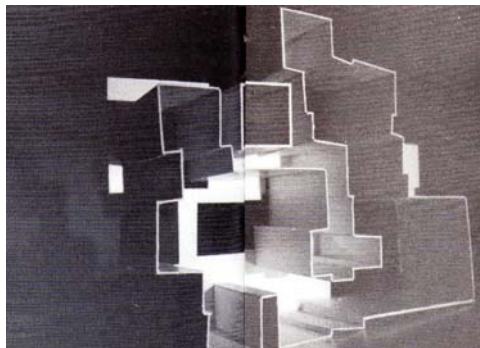
As experiências projetuais elaboradas por Espanés foram adaptadas para o ensino de *CAAD* nesta pesquisa, mas mantiveram sua essência.

Traçado regulador qualificado: um fractal linear em planta ordena a estruturação de elementos verticais e horizontais (Fig. 64), cada aluno define a sua própria regra para dispor os elementos.



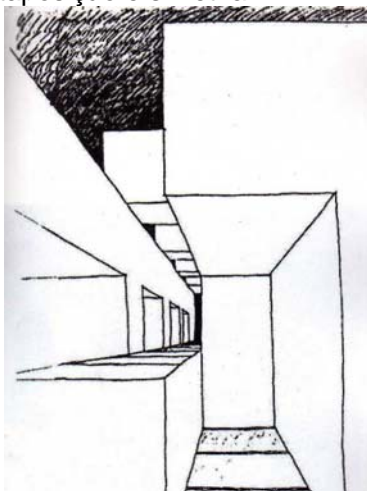
**Fig. 64:** Traçado regulador qualificado (Espanés, 2003:143)

Seção extrudada da planta: a partir de um fractal linear visto em planta, trabalha-se a volumetria de um edifício (Fig. 65). Esta experiência compositiva está modificada nas atividades propostas para se trabalhar a partir da extrusão da planta baixa. O exemplo de Espanés sugere trabalhar qualificando os cheios e vazios.



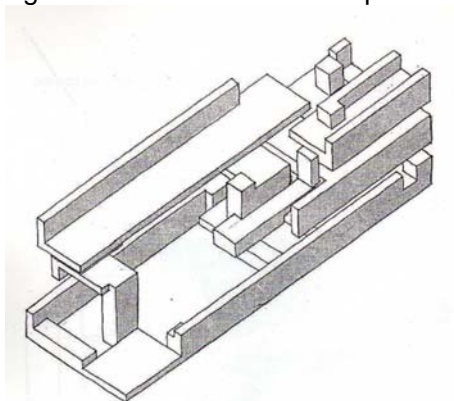
**Fig. 65:** Seção extrudada da planta (Espanés, 2003:144-145)

Módulos fractais bidimensionais: um fractal linear visto em corte deve ser transformado em um volume, depois copiado diversas vezes, invertido ou rotacionado. Cria-se uma composição a partir da sobreposição dos elementos (Fig. 66). Usa as leis de justaposição e simetria.



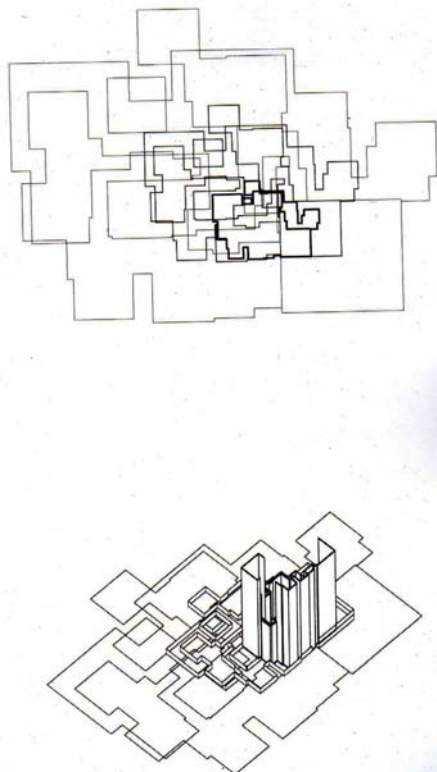
**Fig. 66: Módulos fractais bidimensionais** (Espanés, 2003:147)

Seção extrudada do corte: a partir de um fractal linear replicado, constroem-se objetos diferentes, para então reuni-los e readaptá-los (Fig. 67). Começa-se com explorações abstratas para chegar progressivamente à formas arquitetônicas.



**Fig. 67: Seção extrudada do corte** (Espanés, 2003:152-153)

Sobreposição de escalas: um mesmo fractal é escalonado diversas vezes, sobreposto, e das interseções surgem um edifício, uma praça e um território (Fig. 68).



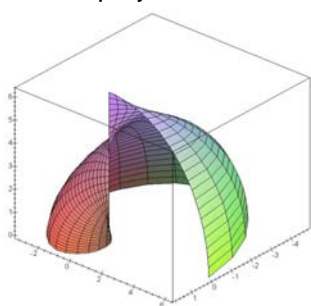
**Fig. 68: Sobreposição de escalas** (Espanés, 2003:159)

Espanés utiliza o vocabulário formal dos fractais para criar volumetrias onde o observador decide os aspectos estéticos que deseja ressaltar ou atingir. A autora faz uma análise da morfologia dos fractais aplicados na arquitetura, deixando de lado os aspectos construtivos e a função. “*A Geometria Fractal pode ser usada como: estrutura, ordem subjacente, sistema de relações internas entre elementos, construção de modelos.* (ibid:97)”. Este método parece ser o mais apropriado para prover estratégias pedagógicas para esta pesquisa e é possível de ser aplicado a um *software* de projeto assistido.

### 3.2.3 Modelo de Baier e Sedrez

O modelo de Baier e Sedrez (2007) surge da necessidade de se trabalhar o conteúdo matemático com significado para arquitetura. Este estudo não utiliza formas fractais, mas a sua linha de pensamento mostra ser apropriada para complementar o modelo de Espanés. A partir do estudo de equações matemáticas, um *software* gera formas em três dimensões, por meio de diferentes sistemas de coordenadas (Fig. 69). Os alunos elaboram esta forma como um esboço, para então estabelecer um programa. A criatividade é um elemento em destaque, pois o objetivo é criar uma proposta diferenciada (Fig. 70).

Este modelo também se assemelha à solução utilizada por Greg Lynn na proposta para o concurso da Ópera de Cardiff. Segundo Lorenz, o arquiteto Greg Lynn desenvolve uma forma básica a partir da análise dos padrões de autossimilaridade encontrados nas baías, rios e portos próximos ao local. *“Só então ele traduziu e adaptou essa forma ao entorno e à função (LORENZ, 2002:52)”*. Também seguem essa linha de pensamento Mayer e Turkienicz (2008:19), que afirmam que a partir de *“composições abstratas iniciais novas, funções podem emergir”*, ressaltando a importância da emergência da função no processo de projeto.



**Fig. 69: Gráfico** (Baier e Sedrez, 2007)

**Fig. 70: Proposta** (Baier e Sedrez, 2007)

A contribuição deste modelo para o modelo de Espanés é principalmente a definição da escala e, em segundo plano, outros elementos de arquitetura. O aluno manipula um objeto num espaço infinito dentro do computador. O desafio é visualizar uma

escala para aquele objeto, aprimorando a percepção quanto à emergência da função. A Geometria Fractal possui múltiplas escalas e cabe ao projetista definir qual a melhor opção para aquela forma. Complementando com elementos arquitetônicos, o aluno percebe a escala do objeto, até que possa com segurança colocar a figura humana representando a dimensão do objeto.

A união do modelo de Espanés (2003) com o modelo de Baier e Sedrez (2007) é na realidade uma interseção de conhecimentos. Enquanto que o modelo de Espanés oferece regras compositivas baseadas na Geometria Fractal, o modelo de Baier e Sedrez aprofunda a questão da emergência de funções e da definição da escala. Essa gramática utiliza um número finito de iterações, que pode variar conforme a forma final que se queira atingir.

### 3.3 Criatividade e Arquitetura Fractal

Tendo em vista as características morfológicas da Geometria Fractal e os modelos de tradução dos fractais para a arquitetura, pode-se ressaltar a abordagem criativa deste sistema generativo. Manipular formas fractais demanda do pensamento intuitivo e busca o aspecto da beleza da forma. Confirma Montenegro (1987:53) que *“a Geometria Fractal trabalha com o senso estético, a beleza da forma, a organização como conceito de belo, exigindo a intuição do aluno”*. E complementa Mandelbrot (1998:218) que *“o aspecto que mais salta à vista, e o mais inesperado, não é de caráter científico, mas puramente estético”*. Fazer a relação do aspecto estético dos fractais com a criatividade envolvida no processo de gerar as formas é importante para o aluno de arquitetura.

Como ocorre um processo criativo no campo na arquitetura? Segundo Ostrower (1999:10), *“os processos de criação ocorrem no âmbito da intuição”*, e sabe-se que fazer composições arquitetônicas com base na Geometria Fractal dá-se por meio da intuição. Ostrower (*ibid*:68) ainda afirma que *“a intuição caracteriza todos os processos criativos”* e que *“o processo criativo intuitivo é sempre de ordem formal”*. Na



arquitetura, o modelo de Espanés (2003) explicado no capítulo anterior enfatiza o potencial criativo do uso da Geometria Fractal.

Del Rio (1988:203) coloca que “[...] *a elaboração do projeto é dependente tanto da nossa criatividade [...] quanto da nossa capacidade de síntese, de abstração, de criação e de representação*”. Entende-se que um processo criativo se produz quando, primeiramente, ocorre a visualização de alternativas e subsequentes escolhas. A produção de Arquitetura Fractal envolve a criação de formas intimamente ligadas às ciências contemporâneas que estudam a complexidade. Pode-se afirmar que os fractais geram formas que atendem à ideia de criatividade indicada por Fuão (2008:6):

[a criatividade] *na atualidade é medida pelos critérios de inovação, ruptura, pelo surpreendente, pelo shock, o estranhamento, a colisão, a fragmentação e, principalmente, pelo princípio da collage/montagem.*

Para desenvolver o seu processo criativo, o arquiteto cria um vocabulário visual. Conforme afirma Menezes (1999:87-88), o *“arquiteto usa o conhecimento e a criatividade para imaginar [...]”*. Logo, um repertório de ideias pode auxiliar nas escolhas. E complementa Del Rio (1988:206) que é preciso conhecer alternativas e *“[...] admitir que ela [a criatividade] pode ser desenvolvida, educada pelo conhecimento, pelo treinamento e pela capacidade de compreensão dos fenômenos onde está imersa a arquitetura”*. Utilizando fractais no ensino de projeto arquitetônico assistido por computador, objetiva-se a composição criativa, pois a Geometria Fractal fornece possibilidades intuitivas e um repertório de formas.

Já o processo de projeto é visto por Terzidis (1999:5) como um problema mal-estruturado, que pode ser resolvido ao se analisar um conjunto muito grande de alternativas e escolhendo-se, criativamente, a mais apropriada ou criando-se outras possíveis. Na arquitetura, ao trabalhar com formas e composição, as soluções surgem no encaminhamento do processo de criar, para atender ao programa de necessidades, aspectos técnicos e estéticos. Del Rio (1988:201) afirma que *“o ensino do projeto e, em particular, as relações entre a*

*criatividade e o método, são temas de importância fundamental para o pensar e o praticar a arquitetura [...]*”. Então, pode-se explorar também o método de resolução de problemas, que quando utilizado no ensino da composição das formas valoriza o elemento necessário para a arquitetura: criatividade.

É possível desenvolver a criatividade por meio da formação de um vocabulário visual e formal. Utilizar a Geometria Fractal como sistema generativo de formas pode potencializar a criação. Celani (2003) utiliza a Geometria Fractal para desenvolver atividades que relacionem CAD e criatividade. No momento em que múltiplas soluções são expostas por um processo generativo, surge um campo a ser explorado pela criatividade individual.

Joye (2007) explica por que Arquitetura Fractal é algo bom, mesmo que a estrutura fractal no projeto não fique evidente como um matemático gostaria de apreciar. O primeiro ponto é a interdisciplinaridade envolvida no tema, pois artes, matemática, psicologia, estão relacionadas com os fractais. Esta pesquisa relaciona o ensino de projeto arquitetônico assistido por computador através das atividades propostas por Espanés, complementadas pelo modelo de Baier e Sedrez. No próximo capítulo estão apresentadas as ferramentas necessárias para alcançar os objetivos desta pesquisa.

## 4. Métodos e Ferramentas

*“Função e forma seguem o design.”* Philip Jodidio

Este capítulo trata das ferramentas utilizadas na elaboração das estratégias pedagógicas para a abordagem da Arquitetura Fractal. O ambiente virtual de aprendizagem – AVAAD – fornece aplicativos para suportar o conteúdo e atividades, por isso é fundamental conhecer o que é um AVA. O projeto arquitetônico passa por transformações, que estão suportadas nas tecnologias de informática, especialmente os programas de CAD e CAAD. Essas questões são analisadas neste capítulo.

### 4.1 Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e Design

*“Uma escola deveria espelhar as transformações globais da tecnologia, educação e pensamento.”* Daniel Libeskind

Novas relações de aprendizagem estão em pleno desenvolvimento. É o caso do ensino a distância. *“O avanço e os desenvolvimentos tecnológicos, a partir da segunda metade do século XX, impulsionaram e estão transformando a maneira de ensinar e aprender* (PEREIRA; SCHMITT; DIAS, 2007:4)”. Essa modalidade de ensino conta com ambientes que atendem às necessidades diferenciadas dos alunos: ambientes virtuais de aprendizagem (AVAs). A revolução representada pelas novas tecnologias da informática ocorre quando o uso do computador pessoal passa ser acessível, a partir dos anos 1980. E com o advento da internet mais veloz, nos anos 1990, foi possível *“a interligação de todos os computadores, grandes e pequenos, em uma rede de informações dinâmica, descentralizada e heterogênea* (FILATRO, 2004:43)”.

O contexto do ensino a distância contemporâneo, ágil e rápido, demanda ferramentas computacionais que atendam a essa necessidade. Neste ponto, dois campos do conhecimento se encontram: a tecnologia computacional e a informação. De acordo com Filatro (*ibid*:25), *“em resposta às transformações econômicas, políticas e sociais decorrentes do desenvolvimento*

*científico e tecnológico da assim chamada era da informação ou era do conhecimento*", o encontro tecnologia e informação direciona a uma nova maneira de educar. Na arquitetura não ocorre de modo diferente, pois o arquiteto necessita de ferramentas computacionais cada dia mais apropriadas e específicas para exercer sua atividade.

Filatro faz uma diferenciação da educação a distância e da educação digital ou *on-line* pertinente à pesquisa. A autora acredita que a educação a distância é:

*uma atividade pedagógica caracterizada por um processo de ensino-aprendizagem realizado com mediação docente e com a utilização de recursos didáticos sistematicamente organizados, apresentados em diferentes suportes tecnológicos de informação e comunicação, os quais podem ser utilizados de forma isolada ou combinadamente, sem a frequência obrigatória dos alunos e de professores (ibid:47).*

A educação a distância pode ocorrer através dos diferentes suportes tecnológicos: televisão, correspondência, rádio. Já a educação *on-line* ocorre através de um computador com acesso à internet e é potencializada por um AVA. A definição de Filatro (*ibid:47*) é a de que educação *on-line* é:

*uma ação sistemática de uso de tecnologias, abrangendo hipertexto e redes de comunicação interativa, para distribuição de conteúdo educacional e promoção de aprendizagem, sem limitação de tempo ou lugar. Sua principal característica é a mediação tecnológica pela conexão em rede.*

Para Barbosa (2005:31), a Educação a Distância (EAD) serve como ferramenta de construção de conhecimento,

*de modo que qualquer pessoa, independentemente do tempo e do*

*espaço, possa torna-se agente de sua aprendizagem, devido ao uso de materiais diferenciados e meios de comunicação que permitam a interatividade (síncrona ou assíncrona) e o trabalho colaborativo/cooperativo.*

Essa característica, a individualidade, que caracteriza e diferencia o ensino digital, demanda uma atenção maior do educador. O material precisa ser elaborado especificamente para esse ambiente e precisa utilizar diferentes mídias e recursos visuais e sonoros. Por isso, um AVA não é eficiente se não fornecer múltiplas ferramentas ao professor, pois elas são os meios para a construção do conhecimento do aluno.

De acordo com Gomez (2004), o uso da educação digital por meio de AVAs é uma prática que se amplia em universidades de todo o mundo, devido ao aumento da população e ampliação do acesso à universidade, que causa um número grande de alunos. *“Por isso, o uso da tecnologia e, principalmente, da internet, tem sido o foco de investimentos das universidades [...] (GOMEZ, 2004:19)”*.

As ferramentas computacionais para o ensino a distância também se especializam para conteúdos específicos como a arquitetura. Pois os AVAs *“estão sendo cada vez mais utilizados no âmbito acadêmico e corporativo como uma opção tecnológica para atender a esta demanda educacional”* (PEREIRA; SCHMITT; DIAS, 2007:4). Surge assim o Ambiente Virtual de Aprendizagem em Arquitetura e *Design* (AVAAD), com a intenção de responder à necessidade do ensino virtual para Arquitetura e *Design*. Neste contexto, acredita-se que o AVAAD contribua para o ensino da Arquitetura Fractal por sua característica de prover ferramentas informatizadas de apoio ao processo ensino-aprendizagem.

Considerando a definição de Pereira (2007:4), de que *“em termos conceituais, os AVAs consistem em mídias que utilizam o ciberespaço para veicular conteúdos e permitir interação entre os atores do processo educativo”*, pode-se afirmar que a interação é uma questão fundamental no ensino digital. Filatro (*ibid*:29) confirma que ambientes virtuais de aprendizagem são *“espaços multimídia na internet, cujas ferramentas e estratégias visam a propiciar um processo de*

*aprendizagem baseado predominantemente na interação entre os participantes, incentivando o trabalho cooperativo*". Essa troca de informações ocorre por meio das ferramentas síncronas e assíncronas de comunicação, entre alunos e entre professor e aluno. O trabalho cooperativo no AVAAD pode ocorrer por meio do ambiente colaborativo 3D.

Nesta pesquisa valoriza-se a criatividade individual nas atividades que envolvem a simulação 3D, mas a comunicação entre os alunos é explorada através de fóruns de discussão e da metodologia de portfólios que será apresentada no próximo capítulo. De certa maneira, o hiperlivro 'Forma Fractal' segue o modelo de aprendizagem proposto pelo AVAAD, que "*ênfatiza a flexibilidade de local, horários e ritmo de trabalho* (PEREIRA; GONÇALVES; BRITO, 2007:189)" do aluno.

A definição de AVAs de NETO (2006:97) resume os posicionamentos apresentados:

*são ambientes que possibilitam o planejamento de situações de aprendizagem, tornando-as ricas pelo fato de oferecer mais acessos a informações de diversas fontes, complexas, diversificadas e, sobretudo, colaborativas, além da flexibilidade do tempo disponível para o aluno acessar as informações, questões e resolução das atividades.*

O AVAAD é coordenado pela Dra. Alice T. Cybis Pereira e está vinculado ao Laboratório de Ambientes Hipermédia para Aprendizagem (Hiperlab) do Departamento de Expressão Gráfica da Universidade Federal de Santa Catarina. Este projeto recebe apoio do CNPq desde 2001, por meio da concessão de bolsas e recursos financeiros, e tem como objetivo estruturar um ambiente de aprendizagem *on-line* para as áreas de arquitetura e *design* que demandam o uso de linguagem gráfico/visual (PEREIRA; GONÇALVES; BRITO, 2007:188). O Hiperlab desenvolve núcleos de aprendizagem sobre temas da arquitetura: cor, forma, luz, textura, entre outros. O hiperlivro resultante desta pesquisa está disponível no núcleo Forma e foi desenvolvido de maneira que possa ser acompanhado por qualquer interessado.

Dentro do espaço do AVAAD são elencadas as disciplinas e os alunos podem acessar os conteúdos que estão matriculados e alguns conteúdos abertos. O professor da disciplina elabora o conteúdo conforme os requisitos necessários. A maneira mais usual é a construção de hiperlivro.

Dado o avanço tecnológico que possibilita o ensino a distância *on-line*, é necessário estar atento às características singulares da aprendizagem neste meio. Gomez (2004:62) afirma que “*o professor deixa de ser um instrutor para ser um construtor e com o apoio das novas TIC's o processo ensino-aprendizagem tem-se tornado mais dinâmico [...]*”. O professor deve transmitir muito mais que o conteúdo, ele deve elaborar a disciplina de maneira a torná-la diferente e atrativa para o aluno, para que possam construir em conjunto o conhecimento. A linguagem do ensino digital possui diversas particularidades e ferramentas. As principais expressões serão explicadas a seguir.

A principal maneira de apresentar um conteúdo em suporte digital através de um AVA é o hipertexto. O AVAAD organiza o hipertexto através de hiperlivros. O hipertexto, segundo Filatro (2004:41), é uma trama, uma espécie de tecido com muitas conexões, que “*podem ser palavras, imagens, gráficos ou partes de gráficos, seqüências sonoras, documentos completos que podem eles mesmos ser hipertextos*”. Apesar dessa configuração complexa, um hipertexto é planejado de maneira a tornar a leitura simples e navegável, fornecendo ferramentas de identificação e localização como o caminho de migalhas<sup>13</sup>, por exemplo.

Ainda segundo Filatro (*ibid*:29), “*um hipertexto vincula as informações contidas em seus documentos, criando uma rede de associações complexas através de links*”. A importância do hipertexto no ensino *on-line* é fundamental, pois ele organiza toda a gama de conteúdo e atividades que o aluno terá à disposição. Lembrando que, quanto mais diversificada for a maneira de apresentar o conteúdo, maiores as chances de a aprendizagem ser efetiva. Por exemplo, alguns alunos conseguem absorver conteúdos mais rapidamente por texto ao invés de imagens, e vice-versa. Demo (2002:172) afirma que o

---

<sup>13</sup> Caminho de migalhas ou fio condutor é um código no ambiente virtual que sinaliza o caminho que se está percorrendo através de links, permitindo retornar a qualquer momento para um espaço já visitado.

usuário, *“usando a base tecnológica, pode imprimir ao hipertexto virtudes criativas, à medida que o interpreta, modifica, refaz, apaga ou recria”*.

A eficiência da educação *on-line* é questionada por não haver contato real do professor com o aluno. Por isso, maneiras de compensar essa ausência são trabalhadas no conteúdo e no formato do ambiente virtual. Demo (*ibid*:37) acredita que *“não cabe dúvida de que é viável aprendizagem virtual, porque é possível pesquisar e elaborar a distância, mantendo com o professor ligação virtual efetiva e mesmo afetiva”*. Para Demo (*ibid*), a aprendizagem a distância pode ocorrer desde que seja orientada e que os processos sejam desenvolvidos por meio de pesquisa e elaboração do próprio aluno.

É interessante conhecer o perfil do aluno virtual ao se iniciar uma disciplina. Uma prática comum aos cursos *on-line* é a criação de uma página pessoal do estudante, e um encontro virtual onde todos se apresentam e colocam suas experiências e expectativas quanto ao curso. Para que o curso tenha eficiência, além da elaboração do conteúdo e coordenação por parte do professor, o aluno virtual tem que possuir algumas características e qualidades (PALLOF; PRATT, 2004:136): acesso à tecnologia e ao computador; interesse em compartilhar experiências; não se sentir prejudicado pela ausência de sinais auditivos no processo de comunicação; capacidade de pensar criticamente e de refletir; saber que a aprendizagem ocorre de diversas maneiras.

O instrutor deve saber que o AVAAD fornece ferramentas úteis ao EAD, especialmente de comunicação síncrona e assíncrona. A comunicação síncrona ocorre quando dois usuários estão *on-line* ao mesmo tempo, por exemplo, em um *chat*. A comunicação assíncrona ocorre quando um usuário visualiza ou responde a outro depois de algum tempo (horas ou dias), por exemplo, um fórum ou *email*. O ideal é que se utilizem todas as ferramentas disponíveis, como correio eletrônico (*email*), *chat* (salas de bate-papo), fóruns de discussão, que são os *“espaços para debates temáticos, por meio de envio e distribuição de mensagens pelos participantes. As mensagens ficam gravadas e obedecem a uma organização lógica, dando origem aos chamados threads ou fio condutores que ligam mensagens relacionadas conforme a ordem de postagem (FILATRO, 2004:42)”*.



No caso de um ambiente virtual de aprendizagem voltado para arquitetura e *design* (AVAAD), Pereira e Maio (2006:105) explicam que “o AVAAD tem como objetivo estruturar, em termos pedagógicos e tecnológicos, ambientes de aprendizagem específicos para áreas que utilizam linguagem gráfico-visual”. O primeiro desafio é elaborar os conteúdos clara e objetivamente, tendo em vista que em AVAs deve-se compactar os textos para captar a atenção do estudante. A contribuição dessa ferramenta mostrou ser fundamental para o conteúdo apresentado. Seria difícil imaginar ocorrendo de maneira diferente.

## 4.2 Projeto Arquitetônico

*“O homem reage a forma, superfície e massa do que se lhe apresenta aos sentidos, e certas distribuições na proporção da forma e da superfície e da massa dos objetos têm como resultado sensação agradável...”* Herbert Read

Nesta seção será estudada uma visão geral da elaboração do projeto arquitetônico por alguns autores e apresentados os processos pelo qual um projeto pode ser organizado para alcançar uma forma final. Expõem-se quais são as propriedades da forma, quais princípios pode-se considerar para a criação de formas e como esses conceitos contribuem para esta pesquisa. Afonso (1985) explica que ideia seria a concepção do projeto, é a imagem mental do projeto; método seria processo de projeto, é o modo de transcrever a ideia para a realidade; e linguagem seria o modo de expressão da arquitetura, é o vocabulário utilizado no método.

Um dos requisitos para a disciplina de projeto arquitetônico é o conhecimento da composição, ou exercícios para organizar uma imagem mental em projeto baseados em regras. Dentro da realidade contemporânea, outras maneiras de compor emergem e uma delas é a ordem que oferece a Geometria Fractal. De acordo com Szalapaj (2005:4, tradução nossa), “*é importante reconhecer que a atividade de projeto incorpora tanto análise intuitiva/intangível quanto análise formal/tangível, de uma maneira que seja transparente para o projetista*”. Parece que é necessário haver um equilíbrio entre

essas análises. Sabe-se que os fractais podem contribuir para a análise intuitiva, enquanto as formas são geradas.

O projetista conhece as propriedades visuais das formas, conforme esclarece Ching (1998:34-35): formato, contorno característico de uma forma, é o aspecto identificável das formas; tamanho são as dimensões dos objetos, *“sua escala é determinada por seu tamanho relativo a outras formas de seu contexto”*; cor é a percepção visual da luz nos objetos; textura define-se como a qualidade visual e tátil da superfície dos objetos; posição é a situação da forma dentro do contexto; orientação, a direção em relação ao solo ou outros objetos; inércia visual, o grau de estabilidade de uma forma, que depende de sua geometria, orientação, gravidade e linha de visão.

As atividades a serem selecionadas envolvendo a Geometria Fractal podem ocorrer por meio de um processo de composição até chegar a uma forma final, ou seja, um contorno final singular. Neste ponto o aluno pode determinar a escala do objeto, a relação de tamanho. Por isso a importância da complementação do modelo de Espanés, que define a forma, com o modelo de Baier e Sedrez, que define o uso e a escala. A cor e a textura são aspectos requisitados aos alunos e explorados através das funcionalidades do *software* Sketchup. Posição, orientação e inércia visual são propriedades mutáveis e que no contexto estudado são modificadas pelos alunos até que estejam satisfeitos com o resultado final.

Para executar essas atividades é preciso saber que *“o arquiteto tende [...] a trabalhar como um artista, concentrando-se em seus modelos analógicos”* (MARTINEZ, 2000:12). Os modelos analógicos para Martinez são os desenhos e maquetes, uma vez que apresentam características análogas, ou seja, são parecidos na forma, nas relações geométricas e na escala do objeto que será futuramente construído. Para Mahfuz (1995:23), o projeto pode iniciar com uma imagem conceitual do todo que será desenvolvida, *“projetar com imagens conceituais torna possível a passagem do pensamento pragmático para o criativo”*.

Quanto aos métodos de composição, Mahfuz (*ibid*:70-92) cita quatro que empregam analogias no processo criativo: método inovativo, método tipológico, método mimético e método normativo. O método normativo se estabelece quando as formas são criadas com auxílio de normas estéticas ou princípios

reguladores, como geometrias pré-determinadas e regras de combinação. Sendo a norma um sistema geométrico, o sistema generativo de formas fractais seria uma grelha reguladora. Portanto, o método normativo descreve o processo a ser aplicado na criação das atividades do conteúdo pedagógico sobre fractais.

O processo de projetar pode ser entendido como fazer composições e, de acordo com Martinez (2000:44), a *“composição arquitetônica, o desenho, consiste em manipular entidades, às quais se atribui o valor de signos que aludem aos elementos, dispondo-as reciprocamente no espaço [...]”*. Essas figuras são objetos sugestivos que ainda podem ser modificados até que o processo seja concluído. *“Por meio do repertório formal/compositivo/construtivo da arquitetura é que uma imagem pode vir a ser, primeiro um todo conceitual, depois um partido e, ao ser desenvolvido, um projeto (MAHFUZ 1995:27)”*. Portanto, a composição arquitetônica tem um objetivo diferente das técnicas de representação cuja finalidade é a materialização ou construção do objeto.

Na composição arquitetônica utiliza-se de elementos de arquitetura e elementos de composição que possuem uma diferenciação. Segundo Martinez (2000:129), elementos de arquitetura *“são coisas concretas, têm natureza definida”* (janelas, tijolos, telhas, paredes, portas, tetos). Os elementos de composição são conceitos: *“ambientes de certas proporções, de dimensões relativamente definidas, porém sempre, por princípio, longe do grau de definição que têm naturalmente os Elementos de Arquitetura (ibid:129)”*. São os espaços de um edifício, os cheios e vazios, as circulações e ambientes.

Ainda segundo Martinez (ibid:159), compor *“é colocar juntas, soldar, unir partes de um todo”*. Estas partes são os elementos de composição que são unidos por meio de uma ordem. Os princípios para se determinar uma ordem, organização, em arquitetura são definidos por Ching (1998:321). Na composição fractal destaca-se a simetria, em que os fractais apresentam diversos tipos de simetria recursiva - radial, concêntrica, nuclear, espiral, subdivisão interna (CELANI, 2003); a hierarquia (o processo de recursividade hierarquiza formas pelo do tamanho ou pela forma); e o ritmo (os fractais geram ritmos pela alternância de elementos na mesma forma).

A Geometria Fractal potencializa a criação de formas por meio de um processo de recursão, a qual se pode chamar de sistema generativo. Este tipo de sistema fundamenta-se na emergência de formas em meio a uma ordem reguladora. Para Batty (2007:10), os sistemas generativos são de fato fundamentais para simular complexidade e seu uso no planejamento urbano recente é um bom exemplo de como a Teoria da Complexidade está começando a influenciar trabalhos empíricos.

Já na arquitetura, os modelos que empregam fractais são uma resposta afirmativa de que é possível abordar a complexidade no projeto arquitetônico. De acordo com Celani (2003:130), um sistema generativo “*é aquele que produz uma variedade de soluções em potencial para serem avaliadas, como, por exemplo, objetos resultantes da enumeração das combinações possíveis de suas partes*”. Por isso, o modelo de Espanés ao gerar alternativas de composição fractal de formas arquiteturais está criando objetos resultantes de combinações e gerando complexidade.

Celani (2004) afirma também que “*além da geometria de fractais e das shape grammars, outro exemplo de sistemas generativos que vêm sendo utilizados por arquitetos são algoritmos genéticos*”. Os tipos de sistemas generativos, como exposto por Celani, são diversos, incluem os fractais e têm implicações ao projeto. Em um processo que é guiado por um modelo generativo, o projetista cria regras de composição. Utilizando a Geometria Fractal, essas regras estão estabelecidas e o projetista atua na seleção das formas.

Reis (2002), no livro ‘Repertório, Análise e Síntese’, explica a composição em projeto arquitetônico. Para ele, a volumetria é o resultado de regras compositivas:

- A unificação de elementos: objetos próximos, similares, orientados no mesmo sentido ou em mesmo fundo são agrupados pelos olhos humanos.
- A regularidade na relação entre elementos: textura, ritmo e a hierarquia dos objetos são elementos compositivos que são observados ao se comparar dois ou mais objetos.
- A compatibilidade formal na relação entre elementos: contraste, simplicidade, complexidade e contradição ou ambiguidade são

características dos elementos dentro de uma composição que podem ser exploradas.

- O equilíbrio na relação entre elementos: simetria e balanço assimétrico são relações que o projetista decide conforme o tipo de composição que deseje.

As regras compositivas explicadas por Reis podem ser exploradas nas atividades que pretende essa pesquisa no momento de selecionar a melhor composição, já que dos fractais emergem formas a serem exploradas. A contribuição da Geometria Fractal para o projeto arquitetônico nesta pesquisa é oferecer um sistema de regras generativas de elementos que possibilitam a composição de volumetrias. A seguir se estuda a realidade do projeto arquitetônico assistido por computador e como os fractais se inserem neste contexto.

### **4.3 Projeto Arquitetônico Assistido por Computador**

*“Através dos séculos, arquitetos têm expressado seus projetos em linhas de texto de uma dimensão, em desenhos de duas dimensões, em maquetes de três dimensões, e recentemente em dados digitalmente armazenados em computadores.”* William J. Mitchell

Os projetos de arquitetura atualmente estão suportados pela tecnologia computacional. Por isso, talvez a maneira de projetar esteja modificando. A computação definiu outros parâmetros para arquitetos que usam mais as ferramentas computacionais para definir o projeto. Acredita-se que no ensino deva haver uma mescla entre o modo tradicional e o computacional, valorizando também o desenho manual e a construção de maquetes.

O *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) fez a primeira demonstração de desenho usando um computador como ferramenta em 1963, por um sistema chamado de Sketchpad. O primeiro sistema CAD comercial foi introduzido em 1964 pela IBM. O CAD, originalmente, foi usado somente para criar desenhos de execução em duas dimensões, mas o advento de programas CAD 3D gerou avanços na fabricação de produtos (GIESECKE, 2002).

De acordo com José Pinto Duarte em entrevista à Pupo (2007), as novas tecnologias computacionais para arquitetura são *“muito variadas e o seu número e as capacidades que oferecem têm crescido muito”*. Para facilitar a compreensão, José Pinto Duarte (*ibid*) prefere dividir em três grupos:

- 1) *softwares* de modelação geométrica (do CAD até *software* paramétrico<sup>14</sup>);
- 2) *softwares* de simulação e análise do comportamento dos edifícios sob diversos pontos de vista (funcional, estrutural, ambiental);
- 3) produção assistida por computador de modelos físicos (prototipagem rápida) ou do próprio edifício.

Ainda existem a realidade virtual e a colaboração remota, que podem ser consideradas novas tecnologias. Segundo Orciuoli (2009:76), o *“uso de geometrias complexas, scriptings e programas paramétricos aportam um novo âmbito, desvinculando-se muitas vezes de paradigmas que até há pouco foram marcados pelo Movimento Moderno”*.

Afirma Jodidio (2005:14, tradução nossa) que *“a nova liberdade sugerida pelo computador, capaz de desembaraçar a arquitetura da sua caixa euclidiana e modernista, ainda não atingiu o seu objetivo”*. Jodidio acredita que a tecnologia usada a favor da arquitetura contemporânea tem um potencial muito maior do que o apresentado até hoje. Observa-se que os computadores estão agindo no processo de criação, desenho e também na produção da arquitetura. Como confirma Terzidis (1999:3, tradução nossa), *“hoje computadores estão cada vez mais envolvidos no processo de projeto. Sua função varia de esboçar e modelar, a inteligentes processos baseados em conhecimento de informação arquitetônica”*.

José Pinto Duarte (PUPO, 2007) coloca que *“o importante é perceber que os projetistas têm à sua disposição um leque alargado de ferramentas, umas analógicas e outras digitais, e que as pode combinar criativamente no seu processo de projeto”*. A tecnologia do CAD não serve mais apenas para substituir a régua e o esquadro. O raciocínio projetual também pode ser conduzido por meio de ferramentas digitais. Utilizar a

---

<sup>14</sup> *Software* paramétrico armazena toda modificação na árvore paramétrica, permitindo alterações do desenho em qualquer fase da criação sem ter que redesenhar desde o início.

computação como ferramenta para visualização dos projetos ou volumetrias é atividade já comum entre os estudantes de arquitetura, principalmente pela rapidez com que se pode modificar o projeto e pela facilidade de compreender o espaço planejado. Duarte (1999:135) explica que:

*a noção de arquitetura virtual não se restringe a imagens 3D geradas em computador de um projeto arquitetônico estático e com concepções cartesianas do espaço, mas na interação proporcionada pelas tecnologias eletrônicas e digitais, amplificando as possibilidades de apreensão dos ambientes.*

Duarte (*ibid*:158) apresenta o modo como o escritório do arquiteto Frank Gehry e sua equipe de “*infografistas e arquitetos [...] faz o diálogo computador/arquitetura ultrapassar o caráter representacional*”. Eles utilizam o software Catia<sup>15</sup>, programado inicialmente para a indústria aeroespacial, que é capaz de simular as formas geometricamente em três dimensões e determinar as especificações construtivas. O trabalho desconstrutivista de Frank Gehry, com superfícies irregulares em diferentes angulações, só pôde ser possível de execução através do intenso uso de computador na etapa de criação do projeto. Porém, o Gehry não abandona as técnicas tradicionais de representação, fazendo muitos croquis e maquetes.

Segundo Szalapaj (2005:1, tradução nossa), a construção de relações geométricas em *softwares* de CAAD é uma realidade viável, “*inicialmente através da definição e modificação do usuário de partes parametrizadas dos objetos e cada vez mais através da expressão das relações funcionais entre diferentes objetos geométricos*”. Portanto, a absorção da complexidade por estes sistemas é natural, bem como a percepção do projetista para essas questões.

A mudança na concepção de projeto arquitetônico imerso na era digital é percebida nos benefícios para o processo de produção da arquitetura. Além disso, a computação possibilita o

---

<sup>15</sup> CATIA – Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application.

desenho e construção de formas anteriormente impensadas. Jodidio (2007:38, tradução nossa) explica que:

*enquanto o modernismo se baseava na repetição industrial e em métodos do tipo linha de montagem, o tempo presente está a moldar uma nova arquitetura, intimamente associada ao computador e à sua extraordinária capacidade de criação de componentes específicos para qualquer estrutura.*

Ainda sobre este novo desafio na arquitetura, Nardelli (2007:30) explica que essa mudança não era prevista há uma década:

*em termos conceituais, a arquitetura concebida digitalmente a partir de um espaço geométrico não euclidiano, sistemas cinéticos e dinâmicos e algoritmos gerativos de formas está superando os padrões arquitetônicos tradicionais, auxiliada pela incorporação dos avanços já ocorridos na indústria automobilística, aeroespacial e navegação.*

Tanto Jodidio (2007) quanto Nardelli (2007) explicam como os arquitetos procuram absorver as tecnologias e criar formas mais complexas. Jencks (2002:207, tradução nossa) conclui que *“é também claro que, auxiliado e suportado pelo computador, é muito mais fácil hoje para atingir o novo paradigma, tanto conceitualmente quanto praticamente”*, referindo-se ao início do Pós-modernismo, quando as tecnologias de CAAD não eram tão avançadas.

Szalapaj (2005:9, tradução nossa) explica que *“as representações digitais na arquitetura estão cada vez mais tridimensionais, e não baseadas em desenho”*. Levando em consideração o potencial dos computadores, no que diz respeito ao projeto assistido, aliado ao desenvolvimento tecnológico e baixo preço dos *softwares* e *hardwares* (inclusive *softwares* gratuitos – Google Sketchup), deve-se entender que a



*“capacidade criativa do usuário deve ser a ênfase e o foco nas faculdades de arquitetura”* (MENEZES, 1999:22). Os jovens arquitetos estão conscientes do papel da tecnologia na arquitetura, é o que Jencks (2002) chama de projetistas que nascem sabendo projetar no computador.

A pesquisa de Celani (2003) sobre CAD e criatividade pretende demonstrar que o uso de *softwares* de projeto assistido pode ser explorado criativamente. Celani (*ibid*:XIV) sugere maneiras *“inovadoras de se utilizar técnicas tradicionais, com o objetivo de tornar mais eficiente o processo de criação na mídia eletrônica”*. Uma das atividades propostas por Celani (*ibid*) é o desenho de figuras fractais. Compor formas com o auxílio de uma ferramenta de visualização em três dimensões pode ser a resposta para uma real compreensão da Arquitetura Fractal, pois é possível a manipulação da forma, interferindo criativamente.

Pela dificuldade dos arquitetos em considerar a geometria como uma ferramenta útil, procura-se levar a compreensão de que ela serve como elemento base para a criação de projetos com auxílio de computador, e pode ser explorada durante as diversas fases do curso de arquitetura. O progresso tecnológico e os programas de representação de projeto, além de importantes para o arquiteto produzem significativas mudanças na arquitetura contemporânea. Szalapaj (2005:10, tradução nossa) afirma que o alcance das ferramentas digitais na prática da arquitetura *“está no modo como elas suportam conexões entre o projeto de formas esculturais complexas e métodos racionais de fabricação e construção necessários para executar as formas”*.

Peter Eisenman (2006:601) pensa que *“o paradigma eletrônico impõe um formidável desafio à arquitetura, já que define a realidade em termos de meios de comunicação e simulação, privilegia a aparência à existência e o que se pode ver e o que é”*. O desafio é a simulação da forma e as infinitas opções possibilitadas por ambientes virtuais e *softwares* de CAD. Prado (2003:102) complementa este pensamento, afirmando que:

*com base nesses sistemas de percepção mediados por computadores, estamos redescobrimo e reconstruindo nossas relações com o mundo e*

*habitando-nos a conviver de forma crescente com uma enorme quantidade de informação que se distribui em infinitos percursos e interconexões.*

Segundo Duarte (1999:157), “[...] é importante considerar os trabalhos de simulação de arquitetura como fundamentais às experiências<sup>16</sup> [sic] prévias de projetos”. Ele acredita que a representação visual ainda segue um padrão euclidiano, com perspectivas simples se comparadas ao potencial dos *softwares*, praticamente recriando um desenho que seria feito manualmente. Duarte (*ibid*:158) confia no alcance dos programas para o projeto assistido por computador, pois o computador: “[...] *abole todas as referências reais e, sobretudo, canônicas da arquitetura até então: no universo digital não há horizonte ou gravidade [...] e não há noção apriorística de escala*”. Mas esta pesquisa não se refere somente à representação, mas à criação de objetos com uma morfologia específica, que demandam um processo de desenho particular.

Assim, este modelo de ensino de CAAD inspirado pela Geometria Fractal compreende a realidade computacional e da complexidade. Sendo um sistema generativo de formas, o projeto de Arquitetura Fractal se insere nas tendências da *arquitetura digital* colocadas por Nardelli (2007), pois explora conceitos formais não euclidianos e utiliza sistemas generativos. Não seria inadequado classificar as formas arquitetônicas fractais como uma gramática formal. Seria interessante envolver processos de projeto que tenham conteúdo visual preferencialmente 3D, pois isto ajuda os projetistas a expressar e entender comportamentos de estruturas complexas (SZALAPAJ, 2005). O aspecto fundamental deste capítulo é mostrar que os alunos estão vivenciando uma nova maneira de projetar baseada na tecnologia. A seguir são apresentadas considerações sobre o ensino.

---

<sup>16</sup> O autor utilizou a palavra experiência como sinônimo de experimentação, ou conhecimento pela prática e observação.

#### 4.4 Ensino de fractais

*“Estudantes deveriam ter a chance de questionar e responder de maneira contemporânea às mudanças na sociedade.”* Daniel Libeskind

O ensino de projeto arquitetônico tem evoluído rapidamente nos últimos anos para práticas que possam ser assistidas por computador. Além disso, a realidade computacional também tem atuado no ensino de qualquer disciplina, através dos ambientes virtuais de aprendizagem. Nesta seção são estudados os aspectos do ensino de Geometria Fractal e fractais na arquitetura.

De acordo com a Resolução nº 06 de 02 de fevereiro de 2006 (BRASIL, 2006), que institui as diretrizes curriculares nacionais do curso de graduação em Arquitetura e Urbanismo, o conteúdo didático elaborado por esta pesquisa visa a atender as competências e habilidades estabelecidas no Art. 5º, nas letras:

k) *as habilidades de desenho e o domínio da geometria, de suas aplicações e de outros meios de expressão e representação, tais como perspectiva, modelagem, maquetes, modelos e imagens virtuais;*

l) *o conhecimento dos instrumentais de informática para tratamento de informações e representação aplicada à arquitetura [...].*

Portanto, este conteúdo pode ser incluído nas disciplinas que envolvam o projeto arquitetônico assistido por computador e de modelagem de maneira complementar ou optativo. O estudo da morfologia de fractais integrado ao projeto arquitetônico assistido por computador, apesar de ser uma abordagem recente<sup>17</sup>, é eficiente ao que se propõe: apresentar características fractais, ensinar projeto assistido por computador e criar um vocabulário de formas. De acordo com Orciuoli (2009:76-77), *“a experiência docente de alguns centros acadêmicos [...] aponta para a importância da inclusão de matérias relacionadas a informática, matemática e geometria*

---

<sup>17</sup> Em 2004 ocorre o evento *“First International Conference on Fractal Foundations for 21st Century Architecture and Environmental Design”* na cidade de Madri. (INPHINIART, 2004)

*computacional por meio do uso de programas de desenho mais avançados”.*

Baier (2005:139) desenvolve a tese de que é possível e necessário incluir a Geometria Fractal no currículo de matemática no ensino básico: *“na atualidade [...] torna-se urgente a incorporação nos currículos da Matemática do pensamento não-linear e a abordagem de questões ecológicas”*. Baier (*ibid*) acredita na característica holística dos fractais permitindo diferentes abordagens em áreas como as artes e ciências biológicas, por exemplo. A relevância do conhecimento dos fractais nos dias de hoje é importante, pois estão envolvidos em praticamente todas as áreas de conhecimento (ALVES, 2007).

Sendo a geometria um conteúdo fundamental à arquitetura, os educadores podem explorá-la buscando a criatividade, pois o conhecimento das formas instiga os alunos. De acordo com Barbosa (2002:13),

*[...] assim [prazerosas] são as situações de contemplação de aspectos harmoniosos ou de contraste na arte, na pintura ou arquitetura, ou na própria natureza. [...] Essas sensações produzidas pelos objetos ou situações de beleza coincidem com o estado consciente do sujeito e a representação.*

Barbosa (*ibid*:18) continua seu pensamento afirmando que é importante o uso da Geometria Fractal na sala de aula por sua conexão com várias ciências, pela utilização de tecnologias da informática, pelo aspecto visual dos fractais e devido à possibilidade de despertar e desenvolver o senso estético no aluno. Para Brabandere (2001:119), *“as matemáticas são [...] um maravilhoso instrumento de ótica”* e seu estudo pode provocar uma revolução no olhar, ou seja, uma apreciação da geometria. O aluno de arquitetura necessita de experimentação para o desenvolvimento de um repertório visual, necessita construir e desconstruir formas, conhecer alternativas para criar morfologias.

Ainda hoje a palavra fractal causa certo estranhamento para as pessoas, pois o ensino da geometria na Educação Básica usualmente exclui as geometrias não euclidianas. Para a arquitetura, é necessária a compreensão das diferentes

geometrias e como sua morfologia contribui para a criação de formas. Baier (2005:140) constata que *“no primeiro contato do aluno com a geometria, é estudada apenas a euclidiana, como se fosse a única possibilidade de concepção de espaço, sendo priorizadas as figuras com contornos definidos”*. O estudo de fractais é recente mesmo para os matemáticos, no entanto é possível abordar este conteúdo, pois ele está ligado a diversas áreas de conhecimento. Para Alves (s.d.:41), *“o fato já referido de a forma e a dimensão fractais estarem muito presentes na natureza é, por si só, uma motivação válida para professores e alunos”*.

Mandelbrot (1998:210) descreve algumas potencialidades que observou ao ensinar a Geometria Fractal, das quais são importantes:

1. as imagens produzidas com a Geometria Fractal envolvem quem as manipula;
2. é uma linguagem matemática, cuja pesquisa aponta a novos rumos;
3. os alunos se sentem atraídos pelo uso dos fractais;
4. é útil, pois descreve e controla melhor os fenômenos.

Um teste, aplicado por Montenegro (2005) em fases iniciais de alunos de arquitetura, mostrou que a representação de um tijolo teve mais acertos do que a representação de uma mesa, provando que o ensino da Geometria Euclidiana produz nos alunos facilidade de pensar em objetos sólidos simples. Segundo Szalapaj (2005:48, tradução nossa), a Geometria Fractal *“permite a representação de padrões complexos subjacentes através de transformações repetitivas de simples equações geométricas, e pode ser manipulada através de recursos computacionais de alta velocidade”*.

Para ilustrar a diversidade de conhecimentos que envolvem o desenvolvimento de atividades que construam ou explorem fractais, pode-se relacionar algumas observações de Alves (s.d.: 42-43) para atitudes, valores e competências adquiridas:

*[...] Saber utilizar a matemática na interpretação do real, reconhecendo formas e processos que envolvem conceitos matemáticos. Realizar construções geométricas e reconhecer*

*e analisar propriedades de figuras geométricas, nomeadamente recorrendo a software geométrico. Visualizar e desenvolver um raciocínio espacial na análise de situações e na resolução de problemas em geometria e em outras áreas da matemática. [...] Revelar sentido de estética nomeadamente através da composição geométrica de padrões e figuras, bem como na apreciação de elementos da natureza em que a matemática está patente.*

Na opinião de Ostwald (2001), os arquitetos consideram usualmente a ligação da arquitetura e Geometria Fractal “*mais por sua conexão com a Teoria do Caos e Teoria da Complexidade*”. Ostwald, porém, não relaciona os trabalhos mais recentes como o Modelo de Espanés (2003), que apresenta um sistema generativo de formas que busca a criatividade; o Modelo de Haggard, Cooper e Gyovai (2006), que busca a criação de uma Arquitetura Fractal voltada à sustentabilidade; ou o estudo de Lorenz (2002), que trabalha com a Geometria Fractal em sua precisão matemática.

A Complexidade impõe um desafio para docentes de arquitetura. Segundo Martinez (2000:68), seria possível afirmar quais as razões desta problemática:

*um longo período de funcionalismo rotineiro e de entender as formas como uma mera resultante de processos de determinação de relações funcionalistas e de processos construtivos [...] deixa os docentes de arquitetura perplexos em face aos problemas colocados quando se considera a forma dos edifícios como algo que pode ser estudado em si mesmo.*

Da observação de Martinez também se pode concluir que a morfologia na arquitetura poderia receber uma maior atenção.

Por outro lado observa-se que as características dos edifícios contemporâneos cada vez mais exploram a tecnologia no intuito de criar formas inovadoras. Os arquitetos, segundo Robbin (1996, tradução nossa), não podem estar alheios ao conhecimento dos fractais e da Complexidade, e afirma que *“uma dúzia de engenheiros e arquitetos compartilha a visão, atualmente considerada revolucionária, de que a geometria [contemporânea] direciona a arquitetura avante”*. Portanto, a contribuição da Geometria Fractal está identificada. Os modelos de utilização dos fractais na arquitetura são diversos, sendo necessário um impulso para que este conteúdo chegue ao conhecimento dos jovens arquitetos.

## 5. Design e Aplicação do Hiperlivro

Este capítulo apresenta as estratégias pedagógicas adotadas, os resultados desta pesquisa e a aplicação do conteúdo elaborado em uma turma de graduação de arquitetura, seguidos da estruturação do hiperlivro 'Forma Fractal' e as conclusões.

### 5.1 Estratégias Pedagógicas Adotadas

*“A aprendizagem por exemplos parece ser o método natural de aprendizagem dos seres humanos”. Osame Kinouchi*

A elaboração do hiperlivro 'Forma Fractal', que integra o conteúdo da disciplina CAAD e Criatividade, baseou-se nas estratégias pedagógicas pesquisadas. A taxionomia<sup>18</sup> de Bloom (1972a; 1972b) é uma metodologia de ensino que se traduz em um método útil para a elaboração de conteúdos de caráter prático, pois organiza o pensamento do aluno em níveis de aprendizagem dentro dos domínios cognitivo e afetivo. Essa metodologia pode ser usada para elaborar conteúdos em AVAs, pois sua organização entende o professor como instrutor.

A metodologia de projetos e portfólios de Behrens (2006) insere-se na Teoria da Complexidade e objetiva criar uma ordem nas atividades práticas de uma disciplina. Partindo de um conjunto de projetos (entendidos como exercícios) apresentados como portfólio, o aluno pode comparar seus trabalhos com os colegas, estabelecer autocrítica e ainda perceber a sua evolução na disciplina.

Na pesquisa de um modo adequado de montar e disponibilizar o conteúdo no AVAAD utiliza-se o questionário de Filatro (2004:68-69). Trata-se de um *checklist* com os elementos e fases de desenvolvimento do *design* instrucional. Para o hiperlivro 'Forma Fractal', esse questionário foi respondido conforme segue, para dar uma visão global do trabalho a ser elaborado.

---

<sup>18</sup> Taxionomia – do grego tassein = classificar, e nomos = ciência. É uma sistemática ou categorização.



Fase 1 - Análise do problema: ocorre a definição do conteúdo, verificando se é possível implantá-lo.

#### 1.1 – Identificação de necessidade de aprendizagem

O problema está em propor o *design* instrucional do hiperlivro 'Forma Fractal' para a disciplina CAAD e Criatividade. A solução está em aproveitar o potencial das TIC's e ferramentas do AVAAD e da computação para apresentar o conteúdo de maneira clara.

#### 1.2 – Definição de objetivos instrucionais

Os conhecimentos a serem ensinados aos alunos são os comandos de um *software* de CAAD e conceitos de Arquitetura Fractal. O conteúdo trata de Geometria Fractal e aplicações na arquitetura em aproximadamente dois meses e do *software* Sketchup durante todo o semestre. O conteúdo está dividido em atividades iniciais de CAAD, fractais, Arquitetura Fractal e atividades compositivas e projetuais. As atividades são elaboradas por meio dos modelos de Espanés (2003) e Baier e Sedrez (2007) e o conteúdo pedagógico por meio da Taxionomia de Bloom (1972a; 1972b). A avaliação é feita por meio do resultado das atividades práticas seguindo a metodologia de portfólios de Behrens (2006).

#### 1.3 – Caracterização dos alunos

A disciplina está voltada para alunos de arquitetura de fases iniciais com pouca experiência em CAAD. Portanto, é necessária alguma familiarização com informática. Os alunos precisam conhecer o AVAAD e ter noções de CAAD. O conhecimento adquirido pode ser aplicado nas disciplinas de projeto arquitetônico.

#### 1.4 – Levantamento das limitações

Não se dispõe de orçamento para elaboração deste conteúdo e os profissionais diretamente envolvidos são o arquiteto Maycon Sedrez e a Dra. Alice T. Cybis Pereira. Essa elaboração inicia no segundo semestre de 2007 e é concluída no mês de agosto de 2008. As restrições se encontram na complexidade do conteúdo e possibilidade de não ficar claro aos alunos.

Fase 2 - *Design* e desenvolvimento: planejamento do desenvolvimento do conteúdo.

#### 2.1 – Planejamento da instrução

Os métodos e técnicas instrucionais são a Taxionomia, de Bloom (1972a; 1972b), e Metodologia de Projeto e Portfólios, de Behrens (2006). O conteúdo deve estar relacionado com a atividade do arquiteto em exemplos práticos. A sequência é Geometria Fractal e Arquitetura Fractal com atividades de CAAD. Procura-se diversificar ao máximo as mídias. Os exemplos serão demonstrados por meio de imagens.

## 2.2 – Produção de materiais e produtos

O grau de interação entre os alunos e instrutores deve ser amplo. O *design* gráfico deve seguir o padrão estabelecido pelo AVAAD. O suporte instrucional será atendido pelo arquiteto Maycon Sedrez e pela Dra. Alice T. Cybis Pereira, e o suporte tecnológico será oferecido pelo professor Michel Kramer.

Fase 3 – Implementação: os requisitos necessários para implementar o hiperlivro são analisados.

### 3.1 – Capacitação

Apenas os alunos são instruídos na utilização do AVAAD, não necessitando de treinamento para os instrutores.

### 3.2 – Ambientação

Os alunos estão matriculados no curso de Arquitetura da UFSC e criam um perfil no AVAAD, que serve para toda a sua permanência na graduação. É aconselhável a utilização do navegador Mozilla Firefox para melhor visualização. O tempo de ambientação é rápido, pois o ambiente possui ferramentas já conhecidas por usuários de informática.

### 3.3 - Realização do evento ou da situação ensino-aprendizagem

O curso será a distância, o aluno acessa do seu computador pessoal ou dos laboratórios da UFSC. A organização social da aprendizagem é individual, não há atividades em grupo. As avaliações das atividades possuem espaço para comentários, onde o instrutor pode descrever os motivos da nota.

Fase 4 - Avaliação do Hiperlivro: esta fase é explorada na conclusão desta pesquisa, demonstrando os resultados finais, problemas, erros, maneiras de aperfeiçoamento e continuidade do projeto.

Alguns apontamentos de Pallof e Pratt (2004) são considerados no início da formatação do hiperlivro. Quanto ao

ambiente, a aproximação dos alunos virtuais na disciplina CAAD e Criatividade já existia, pois alguns alunos são da mesma fase do curso de Arquitetura. Porém, existem técnicas instrucionais para facilitar a formação de uma comunidade, de acordo com Pallof e Pratt (2004:50): os alunos fazem apresentações pessoais, um espaço de interação deve ser criado, incentivar o uso do *chat* para conversas, e o instrutor deve demonstrar abertura e bom humor nas colocações.

Quanto às atividades, Pallof e Pratt (2004:54) sugerem incorporar diferentes atividades para atender aos estilos de aprendizagem do aluno virtual. No hiperlivro 'Forma Fractal', as atividades propostas são individuais. O aluno pesquisa e desenvolve os trabalhos individualmente a seu tempo, pois o objetivo da aprendizagem é o fortalecimento da criatividade individual. A aprendizagem deste tema é muito particular e um mesmo desenho de CAAD pode ser feito de inúmeras maneiras. O aluno decide a melhor opção.

Na avaliação, Pallof e Pratt (2004:28) afirmam que os alunos precisam saber de maneira exata como receberão a nota pelo seu trabalho, e isso inclui saber quanto dessa nota é referente à participação *on-line* e aos trabalhos solicitados. A avaliação dos trabalhos segue a proposta de Hernández (2000:162), que indica caminhos sobre como avaliar a atividade de criação em arte ou arquitetura. Assim, são avaliadas: a capacidade de dar forma visual às ideias; a curiosidade, inventividade, inovação; a competência na utilização das ferramentas, dos processos e das técnicas.

### Taxionomia de Bloom

A Taxionomia de Bloom trata dos objetivos educacionais em três domínios de aprendizagem: cognitivo (conhecer e desenvolver habilidades intelectuais); afetivo (sentimentos envolvidos no ensino); e psicomotor (incluir os sentidos do ser humano). Uma taxionomia é uma série de classificações ordenadas de acordo com um princípio, neste caso, elencar os comportamentos do aluno para atingir melhores resultados na aprendizagem. De acordo com Filatro (2004:77), "*a taxonomia [sic] dos objetivos educacionais influenciou significativamente a sistemática do design instrucional, na medida em que criou uma*

*linguagem comum e padronizada para identificar e classificar as atividades educacionais”.*

Bloom (1972a:15) afirma: *“uma taxionomia deve ser construída de modo que a ordem dos termos corresponda à certa ordem real entre os fenômenos representados por estes termos”.* Portanto, Bloom relaciona os processos de aprendizagem pelo qual o aluno deve passar. Para se produzir um material didático, a informação sobre os alunos é uma fonte de reflexão. Outra fonte seriam as condições e problemas da realidade cultural (*ibid*:24). Nesta pesquisa, ambas as fontes foram consideradas. A informação sobre o conhecimento do aluno e seu objetivo ao iniciar a disciplina proposta é relevante e está relacionada nas considerações da Fase 1 (análise) de Filatro (2004).

Explorar a Taxionomia de Bloom, de certa maneira organiza os procedimentos na aprendizagem. Procurou-se intercalar atividades que apresentassem exemplos práticos da aplicação do conteúdo escrito. Segundo Bloom (1972a:41), a taxionomia *“é útil para determinar o nível de especificação dos objetivos formulados a serem utilizados no planejamento de experiências de aprendizagem”* e pode indicar procedimentos para a avaliação.

Para a elaboração do hiperlivro são considerados os domínios cognitivos e afetivos. Bloom (1972b:4-5) coloca que nos domínios cognitivos são explorados

*objetivos que enfatizam a recordação ou reprodução de alguma coisa que presumivelmente foi aprendida, tanto quanto os que envolvam a resolução de alguma tarefa intelectual para qual o indivíduo tem de determinar o problema essencial e, então, reordenar dito material, ou combiná-lo com idéias, métodos ou procedimentos previamente aprendidos.*

E nos domínios afetivos são explorados

*objetivos que enfatizam uma tonalidade de sentimento, uma emoção ou um grau de aceitação ou de rejeição. Os objetivos afetivos variam desde a*

*atenção simples até fenômenos selecionados, até qualidades de caráter e de consciência complexas.*

Os domínios afetivos são importantes em todas as etapas da aprendizagem, são eles que, aplicados na elaboração de conteúdos virtuais, aproximam o aluno do ambiente. São cinco os domínios afetivos. segundo Bloom (*ibid*:97-165):

1. Acolhimento – o aluno deve ser sensibilizado pela existência de certos fenômenos e estímulos, ou seja, dispor-se a prestar atenção.
2. Resposta – é mais do que simplesmente prestar atenção. O aluno está comprometido com a aprendizagem, começa a buscar respostas e estímulos.
3. Valorização – valorizar alguma coisa, um fenômeno ou comportamento. O aluno manifesta seu comportamento em situações e pode caracterizá-lo com a sua opinião.
4. Organização – o aluno organiza esses valores em um sistema e pode determinar qual valor é dominante ou universal.
5. Caracterização por um valor ou complexo de valores – uma hierarquia de valores está montada no indivíduo e representa a filosofia de vida ou o modo de ver o mundo.

Na aprendizagem deste tema, os domínios afetivos explorados são o acolhimento, a resposta e a valorização. O acolhimento busca aproximar o aluno do conteúdo que é complexo, por meio de exemplos, comparações e linguagem simplificada e direta, de acordo com as propriedades do AVAAD. A resposta pode ser verificada quando o aluno participa do ambiente, faz perguntas, interage com os colegas. A valorização está tomada nas atividades completadas pelos alunos. É possível verificar o que cada um considera importante, qual sua opinião. Esses três domínios foram implementados sequencialmente a cada capítulo do hiperlivro, seguindo a ordem proposta por Bloom.

De acordo com Bloom (1972a:17), “*os comportamentos no domínio afetivo envolvem um baixo nível de consciência individual*”, ou seja, o aluno está envolvido com os domínios sem ter percepção disso. Já nos domínios cognitivos, os comportamentos são expressos por um grau maior de consciência, sendo mais fácil sua verificação e aplicação. Os

domínios cognitivos, de acordo com os critérios de Bloom (*ibid*:16), são seis: 1. Conhecimento, 2. Compreensão, 3. Aplicação, 4. Análise, 5. Síntese, 6. Avaliação.

A situação inicial da aprendizagem partindo dos domínios cognitivos começa com o Conhecimento, que *“inclui comportamentos e situações de verificação, nos quais se salienta a evocação, por reconhecimento ou memória, de idéias, materiais ou fenômenos (ibid:55)”*. Nesta etapa procura-se a interação do aluno com o conteúdo por meio de conhecimentos que ele já possui relacionando ideias. Capacidades que o aluno deve adquirir: definir, escrever, reconhecer, reproduzir, identificar.

No segundo nível, a Compreensão, o aluno deve ser capaz de *“entender o conteúdo que lhe é transmitido e de fazer algum uso dos materiais ou idéias nela abrangidos (ibid:77)”*. As atividades propostas neste nível fazem uma verificação básica da aprendizagem até o momento, possibilitando a análise do entendimento do aluno e se ele consegue demonstrar quando o uso do conteúdo é necessário. Capacidades que o aluno deve adquirir: classificar, descrever, discutir, explicar, identificar, selecionar.

Na Aplicação, se o nível de compreensão foi atingido, o aluno pode aplicar o conteúdo em um problema novo. *“Ele deverá aplicar as abstrações apropriadas sem que lhe tenha sido sugerido quais são estas abstrações (ibid:103)”*. A aplicação surge quando o aluno se depara com algo novo, mas que pode resolver, através do procedimento explicado por Bloom (*ibid*:104): buscar elementos familiares que guiem as ações, reestruturar o problema no contexto mais familiar, classificar o problema como algo familiar, selecionar abstrações (teoria, princípio, ideia, método) para resolver a questão, empregar as abstrações, encontrar a solução. Capacidades que o aluno deve adquirir: aplicar, construir, demonstrar, empregar, operar, praticar, usar, resolver.

O domínio cognitivo da Análise *“focaliza o desdobramento do material em suas partes constitutivas, a percepção de suas inter-relações e os modos de organização (ibid:123)”*. Fazer a análise do problema é importante para conhecer sua organização e poder relacioná-lo com outros problemas diferentes, porém com certas similaridades. É uma reconstrução do problema, remontando-o em partes que podem

ser descritiva e comparativa. Capacidades que o aluno deve adquirir: analisar, comparar, examinar, experimentar, testar.

A Síntese é a *“união de elementos e partes, de modo a formar um todo (ibid:137)”*. Recombinando as diversas partes e a experiência anterior dos domínios preliminares, o aluno pode elaborar algo novo. Nesta etapa, a experiência pessoal fica evidente, pois é possível recombina uma solução com outras, para problemas diferentes. Neste domínio cognitivo, encontram-se as principais atividades do hiperlivro ‘Forma Fractal’. É possível entender isto a partir das capacidades que o aluno deve adquirir: compor, criar, desenvolver, montar, organizar, projetar.

E, por fim, o domínio cognitivo da Avaliação pode ser explicado como o *“processo de julgamento acerca do valor de idéias, trabalhos, soluções, métodos, materiais etc., realizados com um determinado propósito (ibid:157)”*. A avaliação como etapa final propõe ao aluno que coloque sua opinião sobre o problema, baseando-se nas etapas anteriores. Capacidades que o aluno deve adquirir: avaliar, criticar, comparar, escolher, julgar, selecionar.

A Taxionomia de Bloom demonstra ser apropriada para a formatação de um conteúdo complexo, que demanda atividades práticas em um AVA. Quando se encaixa o conteúdo dentro dos domínios cognitivos tendo em vista os objetivos finais, é simples classificar os objetivos iniciais e intermediários. Assim, a elaboração do conteúdo teórico e prático é ao mesmo tempo desafiadora e prazerosa, pois, encontrando-se as relações entre as classificações, o desenvolvimento do conteúdo flui naturalmente. A utilização dos verbos (capacidades) contribui para o esclarecimento do instrutor do que ele deve esperar do aluno em cada etapa.

### Metodologia de Projetos e Portfólios Behrens

Em 2006, Behrens elabora uma proposta pedagógica alinhada com a teoria da complexidade: a metodologia de projetos e portfólios. A autora defende uma *“visão holística ou sistêmica, tomando como referência o universo feito de conjuntos integrados e inter-relacionados, que não podem ser reduzidos à simples soma das partes que foram fragmentadas (BEHRENS, 2006:22)”*. A metodologia entende os trabalhos produzidos pelos

alunos como partes similares e evolutivas que compõe um conjunto único, ideia que se aproxima com a visão dos fractais.

Behrens (*ibid*:24) complementa que, na Educação Superior, *“torna-se necessária uma formação que crie oportunidades para a proposição de metodologias que estimulem a curiosidade dos alunos e dos professores para buscarem aprendizagem éticas e criativas”*. Por isso, a metodologia de projetos tem o objetivo de explorar respostas para um problema por um grupo ou indivíduo, encarando-o em suas diversas dimensões. Esse problema nunca está isolado, ele pode ser analisado por meio de diferentes disciplinas, é uma proposta multidisciplinar, complementada pelos portfólios.

A metodologia de projetos *“cria possibilidades e mostra variantes nas quais os alunos precisam manifestar seu posicionamento (ibid:42)”*. Assim, o aluno é responsável por analisar e selecionar os conteúdos que melhor dão resposta ao problema segundo a sua opinião. Behrens (*ibid*:51) explica a sua proposta, que relaciona a pesquisa com o ensino:

*A opção por um ensino baseado em projetos proporciona a possibilidade de uma aprendizagem pluralista e permite articulações diferenciadas de cada aluno envolvido no processo educativo. [...] Essa metodologia exige que professores e alunos, ao aprender a aprender, numa ação conjunta, aprendam a investigar e a pesquisar.*

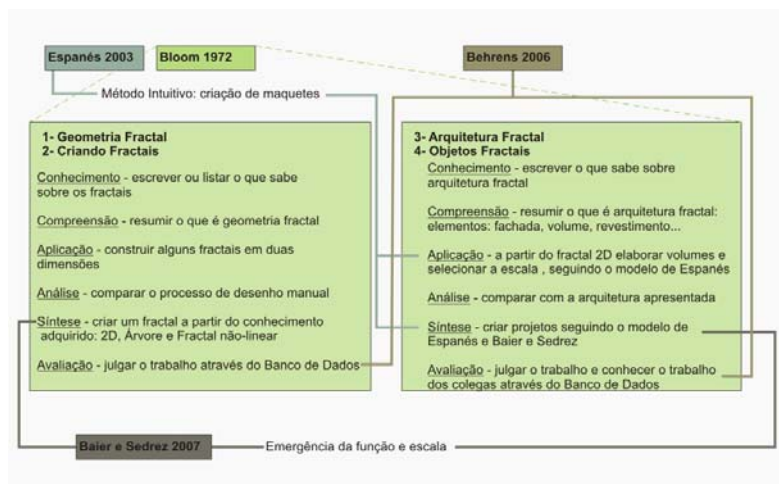
O papel do professor é apresentar os pontos norteadores, direcionar, ou seja, instruir os alunos na busca do conhecimento. Nesta metodologia, os alunos têm de pesquisar e elaborar propostas que respondam aos problemas apresentados. As propostas são apresentadas por meio de portfólios, onde todos os alunos podem verificar as propostas dos colegas e formar uma opinião sobre como aquele problema foi tratado.

No hiperlivro ‘Forma Fractal’, os portfólios são expostos através da ferramenta base de dados do AVAAD. A base de dados permite o envio de arquivos de imagens e posteriormente comentários individuais. Behrens (*ibid*:165) explica que *“a função do portfólio se apresenta assim como facilitadora da*



*reconstrução e reelaboração, por parte de cada estudante, de seu processo ao longo de um curso ou de um período do ensino*". O portfólio permite ao professor verificar o trabalho do aluno no contexto da atividade, ou seja, analisar a produção como um sistema de elementos autossimilares. Também permite uma avaliação comparativa entre os trabalhos de todos os alunos, considerando sempre a característica individual e singular de cada um.

Assim, o hiperlivro 'Forma Fractal' surge a partir das atividades que exploram a morfologia fractal, elaboradas por Espanés (2003) e complementadas por Baier e Sedrez (2007). A Taxionomia de Bloom (1972) serve para montar o esqueleto do conteúdo e mostrar as etapas em que deve ser apresentado. O método de portfólios de Behrens (2006) indica as ferramentas apropriadas disponíveis no AVAAD a serem utilizadas. A Figura 71 ilustra a configuração do conteúdo inserido nas estratégias pedagógicas adotadas.



**Fig. 71: Mapa conceitual de estratégias pedagógicas** (Do autor)

As estratégias pedagógicas integram um conjunto de indicativos que se relacionam entre si e fundamentam o conteúdo a ser ensinado. O resultado é uma organização para montar o hiperlivro de maneira eficaz. Os métodos abordados deixam transparente o papel do aluno e do professor em um ambiente

virtual. Este mapa conceitual de estratégias pedagógicas exemplifica claramente onde atuam cada uma das teorias estudadas.

## 5.2 Fractais nas Faculdades de Santa Catarina

No Brasil, a realidade da arquitetura parece diferir dos outros países. Não foi possível encontrar bibliografia que relatasse projetos brasileiros com inspiração na Geometria Fractal. Para ilustrar a situação do ensino, pesquisou-se nas faculdades do Estado de Santa Catarina os cursos que apresentavam o conteúdo Geometria Fractal ou Arquitetura Fractal, mesmo que inseridos dentro de outras disciplinas. Existem catorze cursos de Arquitetura aprovados no Estado (MEC, 2008), dos quais dois ainda não foram implantados, e dois são da mesma universidade em cidades diferentes, totalizando dez currículos disponíveis.

Por meio de correspondência eletrônica, a pesquisa foi brevemente apresentada e solicitou-se aos coordenadores de cada curso que respondessem o seguinte questionário:

1- O curso de Arquitetura da sua universidade dispõe do conteúdo Geometria Fractal? Em caso positivo, em qual disciplina? A partir de quando este conteúdo foi inserido? Como este é aplicado?

2 - O curso de Arquitetura da sua universidade dispõe do conteúdo Arquitetura Fractal? Em caso positivo, em qual disciplina? A partir de quando este conteúdo foi inserido? Como este é aplicado?

3 - Existe a intenção de incluir estes conteúdos citados nas disciplinas do curso?

Dos doze coordenadores questionados, sete responderam a pesquisa, conforme segue:

- Curso 1

Pergunta 1 - *No momento nenhuma disciplina traz em sua ementa a Geometria Fractal. Porém, estamos em processo de aprovação de um novo projeto político-pedagógico, no qual, na disciplina de Cálculo Diferencial e Integral para Arquitetura, no primeiro semestre estará contemplando. O conteúdo será*

inserido a partir de 2009-2, mas a coordenação ainda não pode afirmar como será aplicado.

- Curso 2

Pergunta 1 e 2 – Não.

Pergunta 3 – *“No momento não há nenhuma discussão a respeito.”*

- Curso 3

Pergunta 1 - *Não, o conteúdo de Geometria Fractal não é ministrado em nosso curso.*

Pergunta 3 - *Os conteúdos de disciplinas são inseridos atendendo ao que determinam as cartas legais do MEC. cremos que na disciplina de Geoprocessamento e Topografia Aplicada devam estar aplicados alguns princípios da Geometria Fractal, principalmente para o planejamento urbano.*

- Curso 4

Resposta geral: *infelizmente não temos este conteúdo sendo tratado no curso. Sei que é uma possibilidade de exploração vasta, mas não temos nenhum professor ou material sobre o tema.* A coordenação encaminhou o email para todos os professores do curso para confrontar a informação, mas não houve retorno.

- Curso 5

Pergunta 1 e 2 – Não.

Pergunta 3 - *Por enquanto não existe a intenção, já que não temos aproximação com o tema, desconhecendo a sua aplicabilidade no ensino de Arquitetura e Urbanismo. Porém, estamos abertos ao conhecimento e adequação da nossa matriz curricular visando a atender a interdisciplinaridade e flexibilidade dos conteúdos.*

- Curso 6

Pergunta 1 e 2 – Não.

Pergunta 3 – *Sim. Provavelmente a partir do 1º semestre de 2010, pois durante o próximo ano estes conteúdos serão motivo de reuniões pedagógicas.*

- Curso 7

Pergunta 1, 2 e 3 – Não.

É possível concluir que as revisões curriculares do ano de 2009 possam incluir o estudo de fractais na Arquitetura, seja nas disciplinas de Teoria e História da Arquitetura, Projeto

Arquitetônico ou Matemática, em duas das doze faculdades. Demonstrando que apesar de grande parte das faculdades não abordarem o conteúdo, a reciclagem dos conhecimentos dos professores, as mudanças de currículo ou mesmo a iniciativa por parte dos estudantes pode colaborar com a difusão da Arquitetura Fractal.

A relevância desta pesquisa transparece, pois, ao se evidenciar a qualidade criativa da Arquitetura Fractal, seu aspecto morfológico e o seu suporte para atividades de CAAD, pode-se difundir ainda mais este conhecimento, especialmente por estar incluído em um AVA. A seguir será explicada a construção do hiperlivro que disponibiliza *on-line* este conteúdo.

### 5.3 Hiperlivro ‘Forma Fractal’

A construção do hiperlivro ‘Forma Fractal’ inicia com a familiarização do professor com o AVAAD. É necessário conhecer seus recursos, ferramentas e a maneira adequada de utilizá-los. O hipertexto é elaborado segundo as diretrizes estabelecidas nas estratégias pedagógicas. As atividades são elaboradas para serem desenvolvidas individualmente, pois se busca explorar a criatividade individual, no mesmo molde da pedagogia da A. A. School, onde os alunos desenvolvem projetos individuais na fase inicial para futuramente trabalharem em grupos na fase de construção do projeto selecionado.

O hiperlivro, além de trazer conteúdo teórico a respeito do tema, propõe atividades práticas de aplicação de fractais na arquitetura. O conteúdo a ser elaborado explora os modelos conceituais na parte teórica e os modelos intuitivos na parte prática das atividades. O *software* utilizado para as atividades de CAAD é o Google Sketchup (versão 6.0), pois suas características facilitam o desenvolvimento das atividades.

Os fractais não lineares são explorados através de dois *softwares*: TreeGenerator e Chaoscope. O TreeGenerator funciona por meio de iterações (L-system) e produz árvores em três dimensões que podem ser exportadas para diversos *softwares* de CAD. Por meio de comandos interativos é possível controlar os parâmetros de cada árvore (BONNEEL, 2007). O

Chaoscope é um *freeware* para renderização de diversos fractais incluindo atratores estranhos em três dimensões (DESPREZ, 2007). A criação de fractais no Chaoscope dá-se por meio de um número finito, porém muito grande, de iterações.

Elabora-se um plano de ensino em conjunto com a Dra. Alice T. Cybis Pereira, que valoriza os fractais como sistema generativo no trabalho com o *software* Sketchup. A disciplina CAAD e Criatividade (optativa) é oferecida por meio do AVAAD, onde os alunos se matriculam regularmente e acompanham as aulas a distância. Em um primeiro momento, os alunos conhecem o ambiente, os conceitos de CAAD, e também as ferramentas do Sketchup. Em seguida fazem exercícios de composição com adição e subtração de elementos e agrupamentos que desenvolvem criativamente os comandos do *software*. Estes exercícios são importados do hiperlivro elaborado para a dissertação de mestrado de Bruno Ribeiro Fernandes (FERNANDES, 2006).

Na segunda etapa da disciplina introduz-se o conteúdo Geometria Fractal e, por meio de atividades, os alunos compreendem conceitos de recursividade, escala, autossimilaridade, simetria, iteração. Em seguida conhecem Arquitetura Fractal e, por meio do Método de Espanés aplicado ao CAAD, executam modelos em três dimensões de formas arquitetônicas.

A Dra. Alice elabora a página da disciplina no AVAAD juntamente com o professor Michel Kramer, dividindo as semanas, disponibilizando materiais, criando fóruns. O professor Michel Kramer é responsável pela parte técnica do AVAAD (atualizações, arquivos, funcionalidade), familiarizando os alunos com as ferramentas. O professor Maycon Sedrez é responsável pelos aspectos didáticos, orientando os alunos, respondendo dúvidas a respeito do conteúdo ou atividades, a partir do conteúdo semanalmente disponibilizado pela Dra. Alice T. Cybis Pereira.

A disciplina CAAD e Criatividade tem duração de um semestre letivo e inicia em agosto de 2008. Oferecida como disciplina optativa e aberta à matrículas de qualquer fase, na ocasião recebe inscrição de vinte e quatro alunos. Três alunos são do curso de Engenharia de Aquicultura e não possuem experiência em CAAD. Do curso de Arquitetura, os alunos se

distribuem da seguinte maneira: seis da 4ª fase, um da 5ª fase, seis da 6ª fase, dois da 7ª fase, um da 8ª fase, um da 9ª fase e um aluno formando, totalizando dezoito alunos e todos possuem alguma experiência em algum *software* de projeto assistido. Três alunos não responderam sua fase ou seus conhecimentos em CAAD.

A página inicial da disciplina conta com uma mensagem de boas-vindas, fórum de notícias (contendo anúncios importantes), sala de bate-papo e *webteca* (contendo arquivos relativos à disciplina).

Semana 1 (04 a 10 de agosto) – A primeira aula é presencial, para que os alunos possam se registrar e conhecer as funcionalidades do AVAAD. Somente dois alunos comparecem, pois ocorre nesta semana atividades de integração do curso, palestras e apresentações de TCC.

Semana 2 (11 a 17 de agosto) – Os alunos matriculados são registrados no AVAAD pelo professor Michel Kramer. Alguns alunos, apesar de registrados, estréiam no uso da ferramenta, enquanto outros já demonstram maior conhecimento. O professor Michel Kramer, através de *email*, solicita para que todos executem as primeiras atividades: preenchimento do perfil pessoal, preenchimento do fórum de apresentação e confirmação de instalação do Sketchup. Vinte e quatro alunos preenchem fórum de apresentação e confirmam a instalação do *software* Sketchup.

Semana 3 (18 a 24 de agosto) – Os alunos entram em contato com os tutoriais básicos do Sketchup, disponibilizados pela Google no site YouTube.com, e podem contar com um guia tutorial de referência. A atividade seguinte é ler o hiperlivro 'Projeto de Arquitetura em Ferramentas Digitais' e responder questões relativas à leitura. Vinte alunos completam essa atividade.

Semana 4 (25 a 31 de agosto) – Iniciam as atividades de composição por adição. Alguns alunos questionam no fórum da semana sobre como elaborar um Domus no Sketchup, respondidos por meio de *slides* no PowerPoint sobre sólidos de revolução e uma explicação do comando *FollowMe*. Mesmo assim, faz-se necessário um tutorial básico no fórum, onde se explica também o comando *Scale* para uma aluna que não consegue executar a atividade. Surgem outras dúvidas por parte

de um aluno, que basicamente se restringem ao agrupamento de objetos. Explica-se os comandos *Select* para seleção de partes ou conjuntos, e *MakeGroup* para agrupar e editar grupos, bem como o processo de soldar automaticamente objetos do programa Sketchup. Dezenove alunos completam essa atividade.

Semana 5 (01 a 07 de setembro) – Apresenta-se o contexto histórico do CAAD/CAD através do hiperlivro 'CAAD: Aspectos Históricos'. A atividade é elaborar uma linha do tempo em 3D. As dúvidas são a respeito de como elaborar a linha do tempo e como importar imagens no programa Sketchup. Dezoito alunos completam essa atividade.

Semana 6 (08 a 14 de setembro) – Os alunos começam nas atividades de composição por subtração. Um aluno pergunta sobre como construir uma esfera. Solicita-se que ele verifique os fóruns anteriores sobre sólidos de revolução. Não há dúvidas relevantes ao CAAD e dezenove alunos completam essa atividade.

Semana 7 (15 a 21 de setembro) – Semana para os alunos terminarem as atividades. Os alunos que não completaram as atividades são contatados para que continuem o trabalho, pois há tempo para recuperar o atraso.

Semana 8 (22 a 28 de setembro) – Semana da Arquitetura, não há atividades.

Semana 9 (29 de setembro a 05 de outubro) – Iniciam as atividades de circulação vertical. A dúvida que surge é a respeito do comando 'Componentes' do Sketchup. Dezoito alunos completam essa tarefa.

Semana 10 (06 a 12 de outubro) – Inicia-se o hiperlivro 'Forma Fractal' a partir do primeiro capítulo: Apresentação e Geometria Fractal (Fig. 72, p. 119). O texto do subcapítulo Apresentação é sucinto e ao final é disponibilizado o mapa conceitual e esquemático da disciplina (Fig. 73, p. 119; 74, p. 119).

O sub-capítulo seguinte, Geometria Fractal, fala da relação dos fractais com a Teoria da Complexidade. São apresentadas as características dos fractais na natureza e uma visão geral do que é um fractal e dimensão fractal. Os conceitos são explorados por meio de exemplos, imagens, sites e vídeo. A atividade proposta consiste em localizar uma imagem sobre fractais, além de criar uma pasta no computador para guardar os

arquivos da disciplina. Dezenove alunos completam a atividade proposta, todos compreendem o objetivo da atividade e procuram imagens realmente significativas.

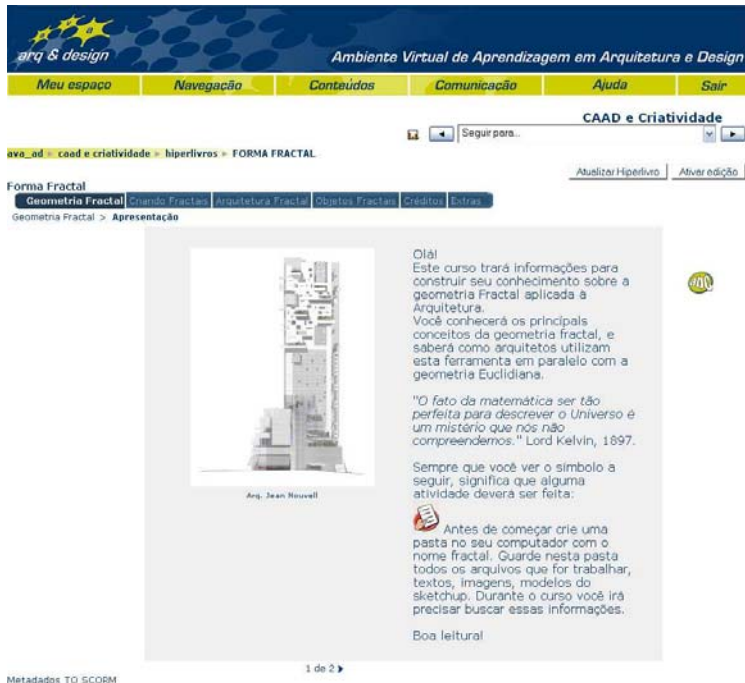


Fig. 72: Tela de apresentação (Do autor)

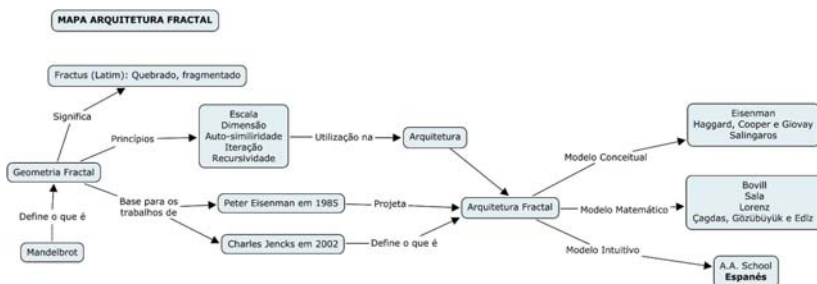
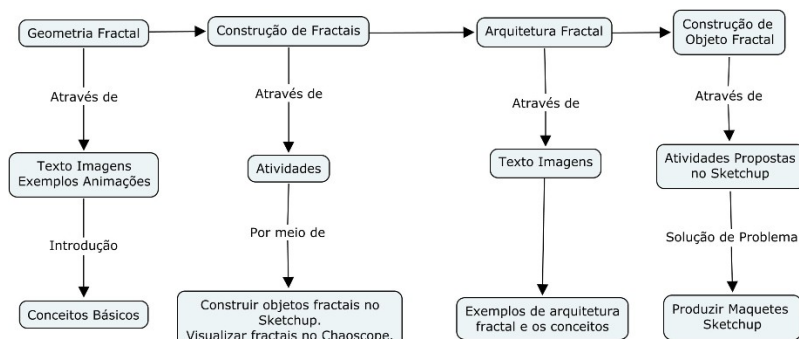


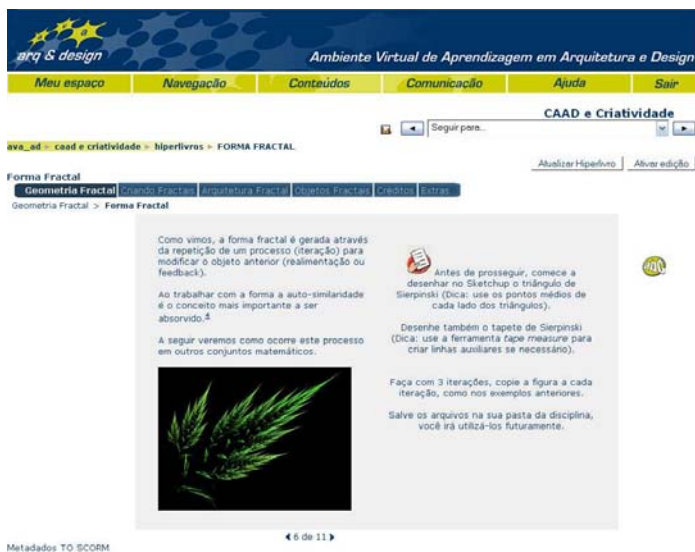
Fig. 73: Mapa conceitual (Do autor)





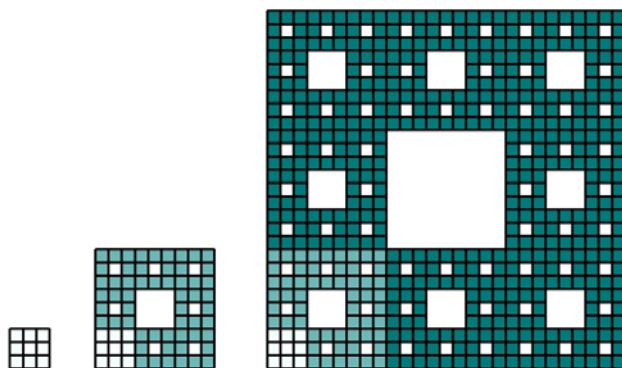
**Fig. 74: Mapa esquemático (Do autor)**

Semana 11 (13 a 19 de outubro) – Ainda no Capítulo 1 (Fig. 75, p. 121), no sub-capítulo Forma Fractal, os alunos iniciam os primeiros desenhos de fractais. Explica-se o conceito de iniciador, gerador e iteração através do fractal Curva de Koch. Em seguida, os principais processos generativos de fractais são exemplificados: a) Iteração e Realimentação: Tapete e Triângulo de Sierpinski, b) Substituição transformadora (IFS): Folha de Barnsley, c) Transformação não linear: Conjunto de Mandelbrot, d) Fractais como janela para o caos: Diagrama bifurcado e Poeira de Cantor. Então se iniciam as atividades sobre a maneira de desenhar fractais: Tapete e Triângulo de Sierpinski, Poeira de Cantor, Ilha de Koch e Curva de Peano. Surge uma dúvida de como gerar a Curva de Peano. Alguns alunos se concentram na forma final, em vez do processo iterativo que gera a forma. Dezesete alunos completam esta atividade.

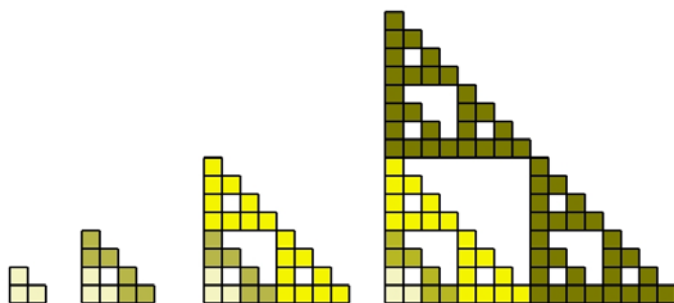


**Fig. 75: Capítulo 1 – Geometria Fractal (Do autor)**

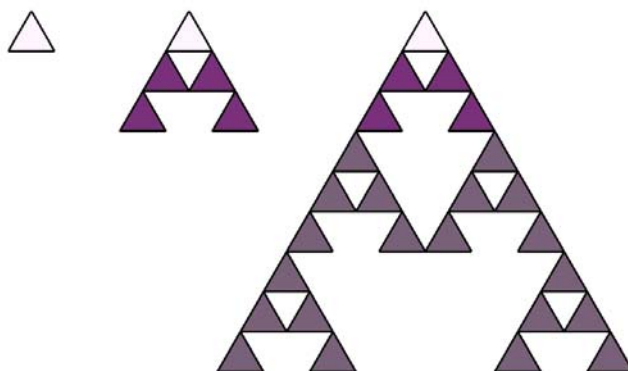
Semana 12 (20 a 26 de outubro) – Iniciando o Capítulo 2: Criando fractais, os alunos compreendem um pouco mais do conceito de recursividade por meio de animações interativas de Jared Tarbell (2003). Em seguida, partem para a criação de fractais exemplificados no Sketchup: Tapete de Sierpinski por adição (Fig. 76, p. 122), Fractal Triminó (Fig. 77, p. 122), Triângulo de Sierpinski por adição (Fig. 78, p. 122), e a criação de um fractal com a primeira letra do seu nome (Fig. 79, p. 123). Dezoito alunos completam as atividades propostas. As atividades de adição de elementos são construídas por meio dos comandos *move/copy*, *rotate*, *orbit*, *pan*, *zoom*, *tape measure*, *paint bucket*, *eraser*, *line*, *rectangle*, *midpoint*, *endpoint* e atalhos, teclas *control* e *shift* do teclado.



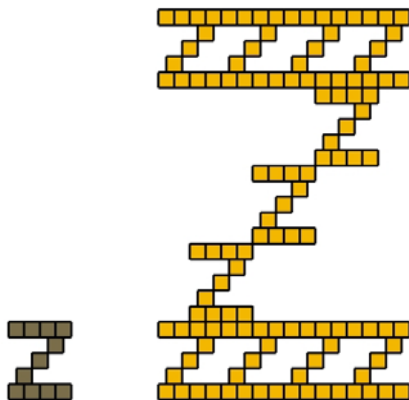
**Fig. 76 Tapete de Sierpinski por adição** (Do autor)



**Fig. 77 Fractal triminó** (Do autor)

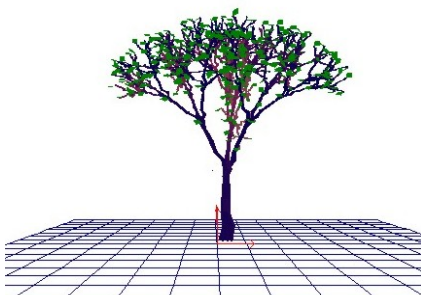


**Fig. 78 Triângulo de Sierpinski por adição** (Do autor)

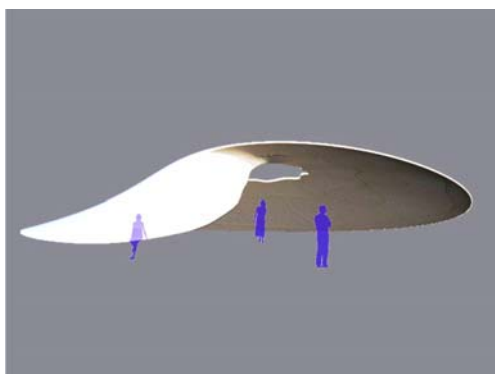


**Fig. 79: Fractal Z** (Do autor)

Semana 13 (27 de outubro a 02 de novembro) – Inicia a segunda parte do Capítulo 2: explorando outros *softwares* de fractais a partir de atividades no Chaoscope e no TreeGenerator. O Chaoscope (DESPREZ, 2007) permite a criação de fractais não lineares. A produção destes objetos é possível por meio de prototipagem rápida (JANSEN, 2008). Os alunos devem criar um fractal não linear, explorar a sua forma como um objeto arquitetônico e relacionar uma escala (Fig. 80, p. 124). O TreeGenerator (BONNEEL, 2007) é um *software* para a criação de árvores com crescimento fractal – *L-system* que podem ser importadas por diversos *softwares* de CAD. O aluno deve manipular os comandos para verificar como pode interferir na forma final das árvores (Fig. 81, p. 124). As dúvidas nessas atividades surgem a respeito da manipulação de imagens no formato jpg. Dezesesseis alunos enviam as atividades, os alunos precisam melhorar a representação gráfica e ter melhor compreensão da escala em arquitetura.



**Fig. 80: Árvore do TreeGenerator (Do autor)**



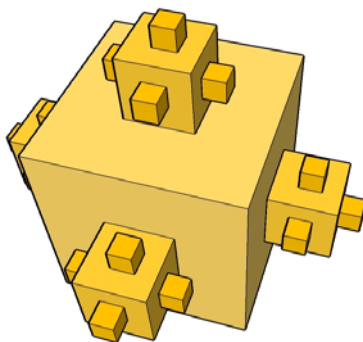
**Fig. 81: Fractal do Chaoscope com escala (Do autor)**

Semana 14 (03 a 09 de novembro) – Começam os conteúdos sobre Arquitetura Fractal do Capítulo 3 do hiperlivro (Fig. 82, p. 125). O histórico da Arquitetura Fractal é explicado, bem como a definição do tema. Os precedentes da Geometria Fractal são apresentados por meio de imagens. Os modelos de tradução dos fractais para a arquitetura são brevemente explicados. Parte-se então para os diversos projetos de Arquitetura Fractal, com um resumo e *link* para o *website* dos arquitetos. A atividade é fazer análise de um projeto exemplificado ou outro relevante para o contexto. Quinze alunos completam essa atividade e não houve dúvidas. As análises são interessantes e permitem aos alunos refletir sobre a qualidade da Arquitetura Fractal.

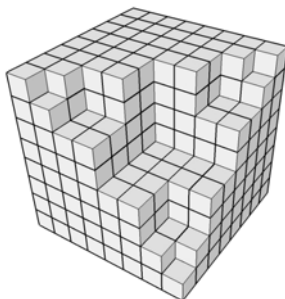


**Fig. 82: Capítulo 3 – Forma Fractal** (Do autor)

Semana 15 – (10 a 16 de novembro) – Começa a leitura das atividades compositivas do Capítulo 4. A primeira atividade é a criação de um cubo com adição de elementos. Essa experiência permite a utilização do comando *make group* e utilização de atalhos como o *control* e linhas guias do Sketchup (Fig. 83). A seguir é proposta a criação da Escada do Diabo em três dimensões. Com a subtração de elementos, as ferramentas de seleção são exploradas (Fig. 84, p. 126).

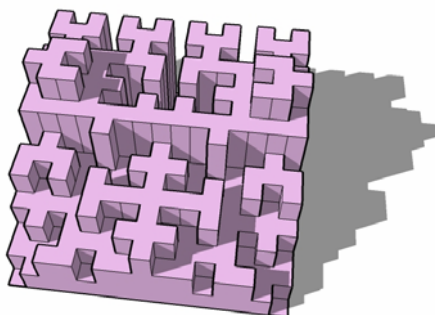


**Fig. 83: Cubo por adição** (Do autor)

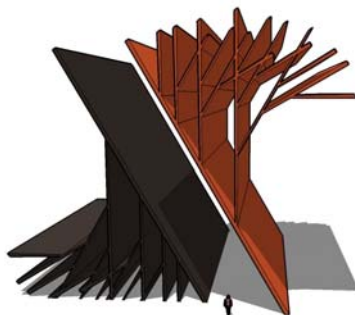


**Fig. 84: Escada do Diabo** (Do autor)

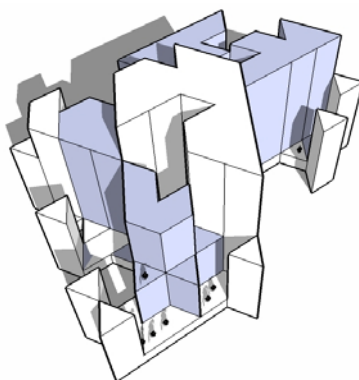
A Curva de Hilbert também é apresentada e o aluno deve extrudar os elementos (Fig. 85). Criação de fractal árvore ou L-system permite a utilização do comando *protractor* para o desenho de ângulos exatos. Ao girar, modificar e extrudar o objeto o aluno deve selecionar um escala final (Fig. 86, p. 127). Por fim, é adicionada aleatoriedade na criação do Triângulo de Sierpinski, que deve ser extrudado e finalizado com a escala (Fig. 87, p. 127). As alturas extrudadas são determinadas pelo próprio aluno, que faz escolhas visuais, criativas e estéticas. Esta fase concluída, o aluno deve compreender o processo generativo dos fractais, como subtrair e adicionar elementos em uma composição e o como fazer uso da extrusão.



**Fig. 85: Curva de Hilbert extrudada** (Do autor)



**Fig. 86: Fractal L-system com escala** (Do autor)



**Fig. 87: Triângulo de Sierpinski aleatório** (Do autor)

Semana 16 (17 a 23 de novembro) – Semana para desenvolver as atividades compositivas. Dezoito alunos completam esta atividade que serve para exemplificar a maneira de trabalhar com fractais no Sketchup, partindo dos exercícios de Espanés, complementado com o modelo de Baier e Sedrez. Os alunos começam a dominar o processo generativo e a seleção de escalas.

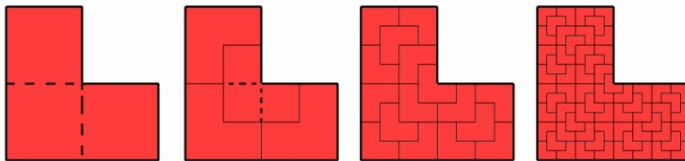
Semana 17 – (24 a 30 de novembro) – Começa a leitura das atividades projetuais do Capítulo 4 (Fig. 88, p. 128). A dúvida foi a respeito de como fazer sobreposição de planos. A primeira atividade foi o Traçado Regulador, onde as diversas funcionalidades do Sketchup são utilizadas: linhas-guias, pontos-médios, seleccionar, duplicar, criar grupo, girar. O fractal



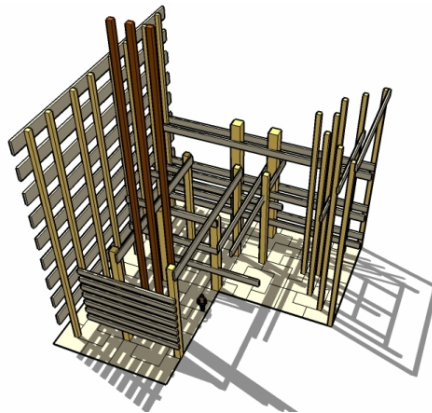
selecionado para esta atividade foi o L fragmentado (Fig. 89), que serve como base reguladora de elementos verticais e horizontais (Fig. 90).



**Fig. 88: Capítulo 4 – Objetos fractais (Do autor)**

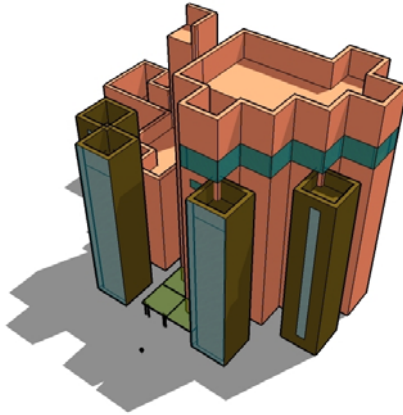


**Fig. 89: Fractal L (Do autor)**

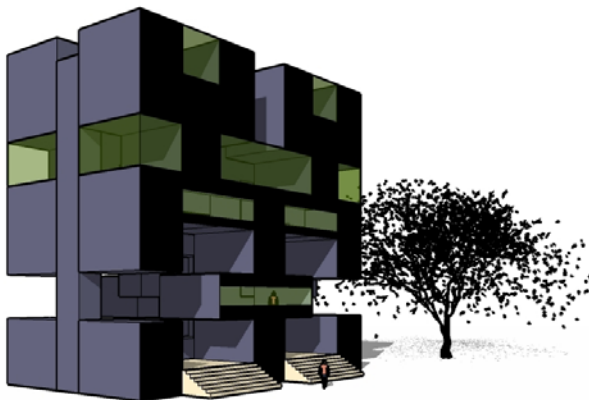


**Fig. 90: Traçado Regulador (Do autor)**

A segunda atividade é a Seção Extrudada da Planta Baixa. As funcionalidades para se desenhar ângulos são importantes na criação do fractal Dragão e a ferramenta *offset* gera as paredes necessárias para a extrusão (Fig. 91). A terceira atividade é a criação de Módulos Fractais Bidimensionais. A Curva de Hilbert já desenhada anteriormente é utilizada e o comando *rotate* é bem explorado (Fig. 92).



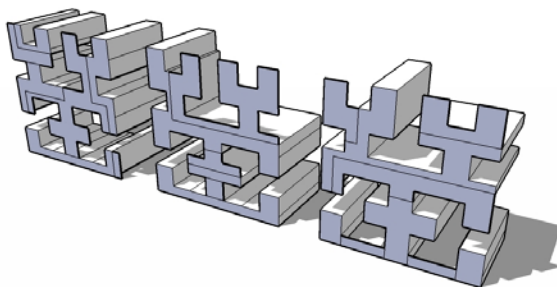
**Fig. 91: Seção extrudada da planta baixa** (Do autor)



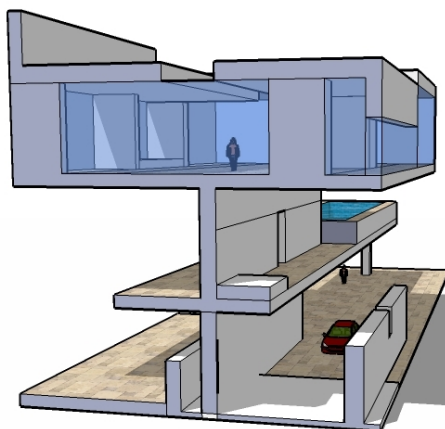
**Fig. 92: Módulos fractais bidimensionais** (Do autor)

Utilizando novamente a Curva de Hilbert para criar a Seção Extrudada do Corte, o aluno deve fazer uma composição

de partes separadas, juntá-las e recompor o conjunto. Ele deve criar grupos, unir partes, subtrair e adicionar elementos (Fig. 93). Admite-se uma grande liberdade projetual, pois não está em análise a estabilidade da construção (Fig. 94). A forma derivada de um processo generativo é o foco destas atividades.

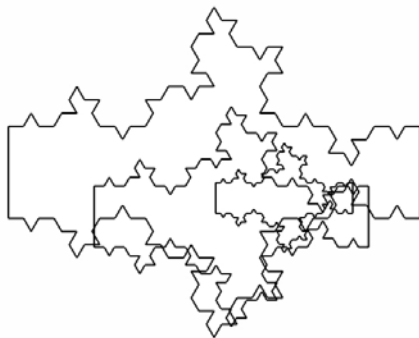


**Fig. 93: Módulos de Hilbert extrudados** (Do autor)

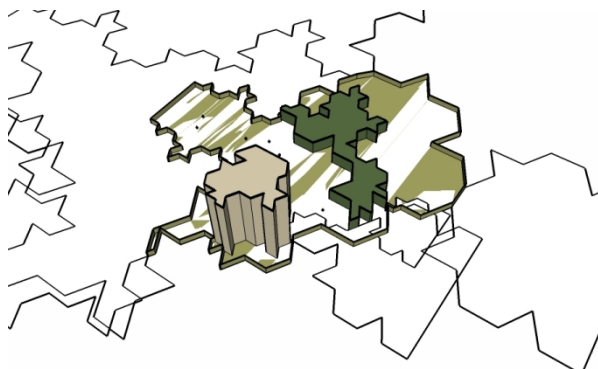


**Fig. 94: Seção extrudada do corte** (Do autor)

A última atividade é a Sobreposição de Escalas, onde o aluno praticamente reúne todo o conhecimento adquirido na composição de fractais em arquitetura e das funcionalidades do *software* Sketchup. A sobreposição dos elementos em escalas diferentes cria áreas de intersecção (Fig. 95, p. 131). Cabe ao aluno distinguir áreas propícias para a criação de volumetrias, de praças, e do território como um todo (Fig. 96, p. 131).



**Fig. 95: Sobreposição de um fractal** (Do autor)



**Fig. 96: Sobreposição de escalas** (Do autor)

Semana 18 – (01 a 07 de dezembro) – Semana para desenvolvimento das atividades projetuais. Catorze alunos completam essa atividade, que obteve bons resultados. Com propostas diversificadas e bem elaboradas, os alunos desenvolvem um processo criativo com a percepção de que o resultado depende das alternativas de cada atividade.

O hipertexto 'Forma Fractal' procura abordar todos os aspectos da Arquitetura Fractal e indicar atividades que trabalham a composição morfológica de objetos fractais. O hipertexto tende a evoluir com as discussões sobre o tema e acrescentar novidades. A intenção é de que esse objeto de aprendizagem passe por um processo contínuo de evolução, abordando outros *softwares* de projeto, outros aspectos do tema CAAD e projetos de Arquitetura Fractal.

Ao final da disciplina questionou-se aos alunos:

- 1) Seus conhecimentos sobre o projeto arquitetônico por computador evoluíram? Você identificou novos meios de explorar e desenvolver um projeto?
- 2) Os fractais contribuíram com a criatividade nas atividades? Você acredita que fez escolhas criativas? O que destacaria?
- 3) As formas que você gerou sugeriram usos facilmente? As formas geradas são interessantes para a arquitetura?
- 4) Você considera que o Sketchup suporta o desenvolvimento de Arquitetura Fractal?

Para a pergunta 1, os alunos respondem que aprenderam novos comandos e atalhos do programa, também puderam experimentar novas formas, complexas e variadas. Na segunda questão, os alunos acreditam que o conteúdo contribui tanto conceitualmente quanto morfologicamente na composição em arquitetura. Destacam as formas inusitadas e a possibilidade de escolhas, a relação entre os volumes e a abordagem do conteúdo Arquitetura Fractal.

Na pergunta 3, a fluidez do processo foi apontada, bem como a fácil adaptação da forma aos usos e funções, ou seja, a emergência da função é uma estratégia rapidamente absorvida. Um dos alunos relata que nunca havia feito o caminho inverso: definir a volumetria e em seguida as funções. Os alunos acreditam que trabalharam a criatividade e a experimentação. A definição de escala é fácil e houve uma rápida adaptação a esse método de projeto. Ressaltam que o arquiteto deve conhecer o potencial de se trabalhar com fractais. Na questão 4, destaca-se a simplicidade de utilização do software e a rápida visualização, além de gerar arquivos compactos. Porém acreditam que seria difícil planejar projetos de alta complexidade.

Quanto à criação de um repertório de formas, o sistema de portfólios possibilitou ver os trabalhos dos colegas, comparar projetos que surgiram de um mesmo objeto fractal, mas que cada aluno pode dar sua característica pessoal. Além das atividades oferecidas, o método do deslocamento do ponto médio tem um grande potencial, mas não pode ser estudado pela questão do tempo ser restrito.

Este trabalho concluiu-se como referencial para todos que têm interesse na Arquitetura Fractal. Alguns dos melhores trabalhos sobre o tema estão examinados na pesquisa e possibilitam diversas aproximações e caminhos didáticos. O principal resultado é o hiperlivro 'Forma Fractal', que propõe atividades de *CAAD* abordando Arquitetura Fractal.

## 6. Conclusões

*“Arquiteto é aquele que vê figuras nas nuvens.”* Pierluigi Nicolini

A criação de objetos arquitetônicos de natureza fractal é possível por meio dos procedimentos explicados nesta pesquisa. Os jovens arquitetos podem tomar ciência de conceitos matemáticos atuais, capazes de gerar uma nova dimensão na arquitetura, valorizando o belo e a criatividade. O panorama da Arquitetura Fractal está em constante atualização, porém se conseguiu identificar edifícios com inspiração fractal.

Esta pesquisa mostrou como é eclético o tema com que se está lidando. O estudo teve de ser aprofundado em diversas áreas do conhecimento, iniciando pela Geometria Fractal, um assunto ainda distante da realidade do arquiteto brasileiro. O tema CAAD exigiu do pesquisador domínio do *software* utilizado (Sketchup), para que as atividades pudessem ser transportadas para este formato. O livro de Gouvêa (2008) auxilia nesta questão. Para desenvolver o hiperlivro, fez-se necessário conhecer os AVAs, suas ferramentas e a maneira adequada de apresentar conteúdos *on-line*.

A situação do ensino de fractais nas faculdades de Arquitetura de Santa Catarina está mapeada. Apesar de nem todos os coordenadores terem respondido ao questionário, a maior parte não possui esse conteúdo relacionado no curso. Por outro lado, a menção de duas faculdades com a intenção de incluir esse tema pode significar uma mudança também no modo de ensinar projeto arquitetônico. Sabe-se que o estudo de sistemas generativos, gramáticas de formas e outras regras é uma tendência nos cursos de Arquitetura.

A elaboração de um conteúdo pedagógico sobre Geometria Fractal e Arquitetura Fractal voltado ao ensino de projeto arquitetônico assistido por computador foi realizada. As atividades de composição foram adaptadas para um ambiente virtual de aprendizagem e para o ensino de CAAD. Por isso o pesquisador aprofundou a pesquisa e os métodos de ensino específicos para essa realidade. O hiperlivro resultante encontra-se disponível no núcleo Forma do AVAAD e é possível modificá-lo, ampliá-lo e melhorar seu conteúdo.

O conteúdo elaborado para o hiperlivro ‘Forma Fractal’ trata dos fractais como sistema generativo de formas, onde seria

possível conhecer a gramática fractal. A emergência da função, processo cognitivo explorado por Mayer e Turkienicz (2008), assemelha-se à experiência de Baier e Sedrez (2007), pois procura definir um uso para uma forma e como consequência a escala. A emergência da função amplia as possibilidades do modelo de Espanés (2003). Esse trabalho pode ser considerado útil para os cursos de Arquitetura como ponto inicial da abordagem do tema. Difundir o estudo da Arquitetura Fractal por meio do AVAAD é possível por meio da oferta de disciplinas que utilizem o hiperlivro elaborado.

A experiência virtual de ensino permite que o hiperlivro seja acessado de qualquer local e é possível inscrever turmas de alunos interessados. Percebe-se que é interessante, do ponto de vista didático, agrupar diversos conhecimentos relacionando-os entrem si. O ensino a distância pode valorizar outros aspectos da aprendizagem, como por exemplo, o aluno estar ciente de que a sua participação é fundamental para adquirir o conhecimento, conforme estuda Pereira (2007). Apesar de nem todos os alunos terem concluído as atividades finais, a participação e o interesse foram significativos. Novas questões pedagógicas surgirão no ensino *on-line*, por isso o hiperlivro deve ser revisado futuramente e adaptado as novas necessidades.

Através do conteúdo conceitual da Arquitetura Fractal, o tema trouxe a compreensão da maneira como os arquitetos podem elaborar as ideias de seus projetos. Cada projeto dos arquitetos que utilizam fractais explora a Geometria Fractal de uma maneira diferente. A forma continua embutida de significados e é resultado de um método de projeto. Nas propostas dos alunos é interessante observar a individualidade criativa de cada um, pois as soluções são diversas para a mesma atividade. Seria possível propor um método e ferramentas para verificar o aprimoramento da criatividade do aluno como continuidade a esta pesquisa.

Assim pretende-se ampliar o estudo da forma e dos fractais no campo da arquitetura. Organizar uma gramática de formas fractais para arquitetura seria uma das intenções futuras, assim como estudar a arquitetura gerada por outros fractais não contemplados nesta pesquisa. Portanto, é necessário direcionar as atividades de maneira a resultar em uma gramática de formas mais completa. Por isso a inclusão de procedimentos de



prototipagem rápida seria interessante para uma segunda etapa de pesquisa.

Este modelo pode ser aperfeiçoado por meio da organização do conteúdo, propondo atividades projetuais mais completas que alcancem um nível maior de detalhamento. As definições da função e da escala são apenas sinalizadas nas atividades do hiperlivro. Assim, se poderia ir adiante definindo um programa para os projetos e representando plantas, cortes e fachadas. Uma questão levantada por um dos alunos é que não se trabalhou com referenciais reais: terreno, localização, paisagem. Como se trabalha com um sistema generativo empregando fractais, e sendo uma primeira experiência, essas questões não estavam contempladas.

Outra recomendação ao conteúdo elaborado é relacionar as atividades compositivas e projetuais com os temas de composição elencados por Clark e Pause (1997). Assim, o aluno ainda tem à disposição regras de composição de elementos em arquitetura que permitirão uma orientação mais completa do sistema generativo fractal. Esse conjunto de informações pode ser criado por meio de uma enciclopédia virtual, onde o conhecimento é construído da parceria entre estudantes e professores. Seria semelhante a uma *Wikipédia* ou à experiência de Heylighen e Neuckersman (2000) no site Dynamo, que pretende conectar e coletar conhecimento sobre arquitetura.

Conclui-se que o aluno precisa ter confiança ao elaborar padrões, relacionar partes e fazer composições, assim como criar um vocabulário. Entende-se que a Geometria Fractal como ordem reguladora e sistema generativo de formas instiga o aluno a elaborar a sua gramática. Por fim, é importante afirmar que a arquitetura contemporânea é complexa e dinâmica. A realidade dos projetos fractais talvez não tenha influenciado os arquitetos brasileiros ainda, porém conhecer esse tema pode ser útil em diversos aspectos. Buscar as mudanças antes que elas cheguem é o intuito da maioria dos arquitetos. E os professores devem fugir do que Daniel Libeskind chama de 'Teoria Congelada', ou seja, a aceitação de regras pré-estabelecidas sem questionar ou propor mudanças.

## 7. Referências bibliográficas

ACADEMIA BRASILEIRA DE LETRAS. **Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa**. 5ª Edição. São Paulo: Global, 2009.

AFONSO, Sonia. **Ideia, método e linguagem**: considerações a respeito da própria experiência sobre o tema. Apresentado na disciplina Projeto como pesquisa contemporânea – FAUUSP. 1985.

AINLEY, Rose. **Pavilhão 2006 – Simon Whittle**. 2006. Disponível em: <<http://aalog.net/?m=200607&paged=2>> Acesso: 30/08/2008.

ALEXANDER, Christopher. **Ensayo sobre la síntesis de la forma**. Buenos Aires: Infinito, 1973.

\_\_\_\_\_. **New concepts in complexity theory** – arising from studies in the field of architecture. An overview of the four books of the Nature of Order. 2003. Disponível em: <<http://www.natureoforder.com/library/scientific-introduction.pdf>> Acesso: 11/11/2008.

ALVES, Célia Maria Filipe Santos Jordão. **Fractais**: conceitos básicos, representações gráficas e aplicações ao ensino não universitário. Dissertação de Mestrado, Departamento de Matemática, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007.

\_\_\_\_\_. **Fractais e sistemas de funções iteradas**. Seminário de Matemática para o Ensino. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. (s.d.). Disponível em: <<http://www.toxxyn.net/kaos/fractais.pdf>> Acesso: 28/10/2008.

Arcspace. **Seção Cinemática – Foa**. S.D. Disponível em: <[http://www.arcspace.com/architects/foreign\\_office/yokohama/yokohama\\_index.htm](http://www.arcspace.com/architects/foreign_office/yokohama/yokohama_index.htm)> Acesso: 24/01/2009.

ARM. **Storey Hall**. S.D. Disponível em: <[http://www.a-r-m.com.au/images/projects/1/photos/storey\\_facadenight.jpg](http://www.a-r-m.com.au/images/projects/1/photos/storey_facadenight.jpg)> Acesso: 24/01/2009.

Arquique. **Projeto Romeu e Julieta – Peter Eisenman**. S.D. Disponível em: <<http://www.geocities.com/arquique/peter/peter04.html>> Acesso: 16/01/2009.

BAIER, Tânia. **O nexo “Geometria Fractal-produção da ciência contemporânea” tomado como núcleo do currículo de matemática do ensino básico**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

BAIER, Tânia; SEDREZ, Maycon R. **Geometria Fractal e arquitetura contemporânea** – Kisho Kurokawa. In: Salão de Iniciação Científica, 13., 2001, Porto Alegre. Anais... . Porto Alegre: UFRGS, 2001.

\_\_\_\_\_. **Uso de gráficos de funções matemáticas, construídos com recurso computacional, na elaboração de projetos arquitetônicos**: uma proposta pedagógica. In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 30., 2007, Florianópolis. Anais... . Florianópolis: SBMAC, 2007.

BARBOSA, Rommel Melgaço (Org.). **Ambientes virtuais de aprendizagem**. Porto Alegre: ArTmed, 2005.

BARBOSA, Ruy Madsen. **Descobrendo a Geometria Fractal para a sala de aula**. Belo Horizonte: Autêntica, 2002.

BARNSELEY, Michael F. **Fractals everywhere**. 2 ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2000.

BATTY, Michael. **Cities as complex systems**: scaling, interactions, networks, dynamics and urban morphology. In: The Encyclopedia of Complexity & System Science, Springer, Berlin: 2008. Disponível em: <<http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingPaperDetail.asp?ID=131>> Acesso: 11/11/2008.

\_\_\_\_\_. **Complexity in city systems:** understanding, evolution, and design. 2007. Disponível em: <<http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingPaperDetail.asp?ID=117>> Acesso: 11/11/2008.

BEHRENS, Marilda Aparecida. **Paradigma da complexidade:** metodologia de projetos, contratos didáticos e portfólios. Petrópolis: Vozes, 2006.

BENEVOLO, Leonardo. **A arquitetura no novo milênio.** São Paulo: Estação Liberdade, 2007.

BLOOM, Benjamin Samuel. **Taxionomia de objetivos educacionais.** Porto Alegre: Globo, 1972a. Vol. 1 Domínio Cognitivo.

\_\_\_\_\_. **Taxionomia de objetivos educacionais.** Porto Alegre: Globo, 1972b. Vol. 2 Domínio Afetivo.

BONNEEL, Nicolas. **Tree Generator.** 2007. Disponível em: <<http://www.treegenerator.com/>>. Acesso: 10/05/2008.

BOVILL, Carl. **Fractal geometry in architecture and design.** Boston: Birkhäuser, 1996.

BRABANDERE, Luc de. **A gestão das ideias:** da criatividade à inovação. Lisboa: Instituto Piaget, 2001. (Sociedade e Organizações, 27).

BRASIL. Resolução nº 06, de 02 de fevereiro de 2006. Institui as diretrizes curriculares nacionais do curso de graduação em Arquitetura e Urbanismo e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 03/02/2006, Seção I, p. 36-37. Ministério da Educação, Conselho Nacional de Educação, Câmara de Educação Superior, Brasília. Disponível em: <[http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/rces06\\_06.pdf](http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/rces06_06.pdf)> Acesso: 14/07/2008.

BROADBENT, Geoffrey. Um guia pessoal descomplicado da teoria dos signos na arquitetura. In: NESBITT, Kate (Org.). **Uma**

**nova agenda para arquitetura:** antologia teórica, 1965 – 1995. São Paulo: Cosac & Naif, 2006.

CADMAN, Steve. **Edifício Seagram – Ludwig Mies van der Rohe.** S.D. Disponível em: <<http://www.flickr.com/photos/stevecadman/74269763/>> Acesso: 14/01/2008. Foto, 2005.

ÇAGDAS, Gulen; GÖZUBUYUK, Gaye; EDİZ, Özgür. **Fractal based design model for different architectural languages.** In: GameSetMatch II International Conference 2006, on Computer Games, Advanced Geometries and Digital Technologies. Universidade de Tecnologia de Delft, Holanda, 29 Março - 1 Abril 2006, p. 280-286. Disponível em: <<http://www.be.itu.edu.tr/lisansustu/mimarliktabilisim/content/pdfler/gayedelft06-bildiri.pdf>> Acesso: 18/11/2008.

\_\_\_\_\_. **Fractal based generative design for harmony between old and new.** In: GA 2005 8th International Conference on Generative Art, Generative Art 2005 Proceedings, Universidade Politécnica de Milão. Milão. Itália. Dezembro 2005, p. 150-159. Disponível em: <[http://www.mimarliktabilisim.itu.edu.tr/content/pdfler/Fractal\\_based\\_generative\\_design.pdf](http://www.mimarliktabilisim.itu.edu.tr/content/pdfler/Fractal_based_generative_design.pdf)> Acesso: 10/02/2008.

ÇAGDAS, Gulen; EDİZ, Özgür. **A computational architectural design approach based on fractals at early design phase.** In: ECPPM 2004: eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, Ed: A. Dikbas, R. Scherer, Balkema Publishers, Setembro 2004, p. 635 - 640. Disponível em: <[http://www.mimarliktabilisim.itu.edu.tr/content/pdfler/ecppm\\_Computational\\_Architectural\\_Design\\_Approach\\_Fractals.pdf](http://www.mimarliktabilisim.itu.edu.tr/content/pdfler/ecppm_Computational_Architectural_Design_Approach_Fractals.pdf)> Acesso: 18/11/2008.

CAPO, Daniele. **The fractal nature of the architectural orders.** Nexus Network Journal, vol. 6, no. 1, 2004. Disponível em: <<http://www.nexusjournal.com/Capo.html>> Acesso: 23/06/2007.

CAPRA, Fritjof. **A teia da vida:** uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. São Paulo: Cultrix, 1996.

CELANI, Maria Gabriela. **CAD criativo**: exercícios para desenvolver a criatividade de arquitetos na era digital. São Paulo: Campus, 2003.

\_\_\_\_\_. Uma introdução ao *computational design* e às *shape grammars* na arquitetura e no desenho industrial. **Interpretar Arquitetura**. Belo Horizonte: UFMG, Agosto 2004. Disponível em: <<http://www.arquitetura.ufmg.br/ia/IA7online/artigo/celaniok.htm>> Acesso: 11/11/2008.

CHEVALIER, Miguel. **Fractal cloud**. 2006. Disponível em: <<http://www.orbit.zkm.de/?q=node/320>> Acesso: 07/01/2008.

CHING, Frank. **Arquitetura**: forma, espaço e ordem. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

CLARK, Roger H.; PAUSE, Michael. **Arquitectura: temas de composición**. México: Ediciones G. Gili, 1997.

DEL RIO, Vicente (Org.). **Arquitetura**: pesquisa e projeto. Rio de Janeiro: UFRJ; São Paulo: Pro-editores: FAU, 1988.

DEMO, Pedro. **Complexidade e aprendizagem**: a dinâmica não linear do conhecimento. São Paulo: Atlas, 2002.

DESPREZ, Nicolas. **Chaoscope**. 2007. Disponível em: <<http://www.chaoscope.org>> Acesso: 10/01/2008.

DUARTE, Fábio. **Arquitetura e tecnologias de informação**: da revolução industrial à revolução digital. São Paulo: Editora da Unicamp: FAPESP: ANNABLUME, 1999.

EGLASH, Ron. **Fractais Africanos**. Homepage Ron Eglash. S.D. Disponível em: <<http://www.rpi.edu/~eglash/eglash.htm>> Acesso: 24/01/2009.

EISENMAN, Peter. "Eisenmanesie". **Architecture + Urbanism**. Ed. Extra: 1988. p. 70.

\_\_\_\_\_. Visões que se desdobram: a arquitetura na era da mídia eletrônica. In: NESBITT, Kate (Org.). **Uma nova agenda para arquitetura**: antologia teórica, 1965 – 1995. São Paulo: Cosac & Naif, 2006.

ESPANÉS, Inés Moisset de. **Fractales y formas arquitectónicas**. Córdoba: I+P División Editorial, 2003.

\_\_\_\_\_. El desafio de los fractales. **Summa+**. Buenos Aires: Donn S.A., n. 51, outubro e novembro 2001. p. 144.

\_\_\_\_\_. Complexity, fractals, architecture. **Quaderns d'arquitectura i urbanisme**. Catalunho: ARCE – Asociación de Revistas Culturales de España, n. 222, 1999. p. 132 -135.

Federation Square. **Federation Square – LAB**. S.D. Disponível em: <<http://www.federationsquare.com.au>> Acesso: 15/01/2009.

FERNANDES, Bruno Ribeiro. **Estratégias pedagógicas de uso de técnicas de computação gráfica como instrumento de apoio ao processo criativo de projeto de arquitetura**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

FILATRO, Andrea. **Design instrucional contextualizado: educação e tecnologia**. São Paulo: Ed. SENAC, 2004.

FORNES, Marc. **The Very Many**. 2008. Disponível em: <<http://www.theverymany.net>>. Acesso: 10/01/2009.

FUÃO, Fernando Freitas. Arquitetura e criatividade. **Arquiteturarevista**. Vol. 4, no. 1, janeiro a junho 2008. p. 1–14. Disponível em: <<http://www.arquiteturar.unisinos.br/index.php?e=7&s=9&a=39>> Acesso: 10/12/2008.

GIESECKE, Frederick E. **Comunicação gráfica moderna**. Bookman: Porto Alegre, 2002.

GLEICK, James. **Caos**: a criação de uma nova ciência. 4 ed. Rio de Janeiro: Campus, 1991. Tradução de: Chaos: making a new science.

GOMEZ, Luiz Salomão Ribas. **Os 4P's do design**: uma proposta metodológica não linear de projeto. Tese de Doutorado, Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

GOUVÊA, Irajá. **Sketchup**: modelador 3D para estudantes de arquitetura. 1ª Ed. Tupã: Ed. FACCAT, 2008.

HAGGARD, Kenneth; COOPER, Polly; GYOVAL, Christine. **Fractal architecture**: design for sustainability. North Charleston: BookSurge Publishing, 2006.

HERNÁNDEZ, Fernando. **Cultura visual, mudança educativa e projeto de trabalho**. Porto Alegre: Artmed, 2000.

HECKER, Zvi. **Escola Heinz-Gallinski**. S.D. Disponível em: <[http://www.zvihecker.com/index\\_entry.html](http://www.zvihecker.com/index_entry.html)> Acesso: 24/01/2009.

HEYLIGHEN, Ann; NEUCKERSMAN, Herman. **Dynamo**: dynamic architectural memory on-line. Educational Technology & Society. 3. 2000. Disponível em: <[http://www.ifets.info/journals/3\\_2/heylighen.html](http://www.ifets.info/journals/3_2/heylighen.html)> Acesso em 18/05/2009.

HOLL, Steven. **Projeto Centro de Visitantes Loisiium**. 2003. Disponível em: <<http://www.stevenholl.com/project-detail.php?type=museums&id=85&page=0>> Acesso: 20/03/2008.

INPHINIART. **First International Conference on Fractal Foundations for 21st Century Architecture and Environmental Design**. 2004. Disponível em: <<http://www.inphiniart.com/congreso/home.htm>> Acesso: 05/03/2008.



JANSEN, Peter. **Strange Attractors**. 2008. Disponível em: <<http://www.strangeattractors.eu/index.html>> Acesso: 22/12/2008.

JENCKS, Charles. **The new paradigm in architecture**: the language of post-modernism. New Haven: Yale Press University, 2002.

JODIDIO, Philip. **Architecture now**: arquitetura dos nossos dias. N. 3. Itália: Taschen, 2005.

\_\_\_\_\_. **Architecture now**: arquitetura dos nossos dias. N. 5. Itália: Taschen, 2007.

JOYE, Yannick. **Fractal architecture could be good for you**. Nexus Network Journal, vol. 9, no. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/d46846t147716m47/>> Acesso: 30/01/2009.

KEYSERLING, Arnold. **Conjunto de Mandelbrot e Julia**. Chance and Choice: a compendium of ancient and modern wisdom revealing the meaning and significance or the myth of science. Disponível em: <<http://www.chanceandchoice.com/ChanceandChoice/index.html>> Acesso: 30/08/2008.

KNUTT, Elaine. Building for the future. **Building Design**, 23 Jun. 2006. Disponível em: <<http://www.bdonline.co.uk/story.asp?sectioncode=453&storycode=3069350>> Acesso: 17/11/2007.

KRAWCZYK, Robert J.; IBRAHIM, Madgy M. **Generating fractals based on spatial organizations**. 2001. Disponível em: <<http://www.iit.edu/~krawczyk/fract01.pdf>> Acesso: 13/09/2008.

KUROKAWA, Kisho. **The philosophy of symbiosis**: from the age of the machine to the age of life. Itália: Edizioni Press, 2001.

LAB ARCHITECTURE STUDIO. S.D. Disponível em: <[www.labarchitecture.com](http://www.labarchitecture.com)> Acesso: 18/11/2008

LAMB, Richard Henry. **Complexidade em arquitetura e urbanismo**: uma avaliação das ciclovias em Florianópolis, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

LI, C. L.; et al. **Modelling of complex fractal objects for aesthetic product development**. International Journal of Product Development, vol. 4, no. 3/4, 2007, p. 207-224. Disponível em: <[http://www.inderscience.com/search/index.php?action=record&rec\\_id=12492&prevQuery=&ps=10&m=or](http://www.inderscience.com/search/index.php?action=record&rec_id=12492&prevQuery=&ps=10&m=or)> Acesso: 10/03/2008

LIBESKIND, Daniel. **Museu Judaico Berlim**. S.D. Disponível em: <<http://www.daniel-libeskind.com/projects/show-all/jewish-museum-berlin/>> Acesso: 24/01/2009.

LINDENMAYER, Aristid; PRUSINKIEWICZ, Przemyslaw. **The algorithmic beauty of plants**. New York: Springer-Verlag, 1990.

LIVELLA, Rogero. **Fractal fern**. S.D. Disponível em: <<http://www.rogerolivella.net/insula/en/descripcio.htm>> Acesso em: 10/02/2008.

LORENZ, Edward N. **A essência do caos**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1996.

LORENZ, Wolfgang E. **Fractals and fractal architecture**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Tecnologia de Viena, Viena, 2002.

MAGALHÃES, Maria Manuela Cordes Cabêdo Sanches Raposo. **A arquitetura paisagista**: morfologia e complexidade. Lisboa: Estampa, 2001.

MAHFUZ, Edson da Cunha. **Ensaio sobre a razão compositiva**: uma investigação sobre a natureza das relações entre as partes e o todo na composição arquitetônica. Belo Horizonte: AP Cultural, 1995.

MANDELBROT, Benoit B. **The fractal geometry of nature**. New York: W. H. Freeman, 1983.

\_\_\_\_\_. **Objetos fractais**: forma, acaso e dimensão seguido de panorama da linguagem fractal. 2 ed. Lisboa: Gradiva, 1998.

MAPT. **Indústrias HUS**. 2008. S.D. Disponível em: <<http://www.mapt.dk/>>. Acesso: 11/10/2008

MARTINEZ, Alfonso Corona. **Ensaio sobre o projeto**. Brasília, D.F.: Ed. UnB, 2000.

MAYER, Rosirene; TURKIENICZ, Benamy. **The cognitive studio**: exercises in design learning. In: Third International Conference on Design Computing and Cognition DCC08. Anais... . Atlanta: DCC08, 2008.

MEC. Ministério da Educação. **Cursos aprovados**. Disponível em: <[http://www.educacaosuperior.inep.gov.br/funcional/lista\\_cursos.asp](http://www.educacaosuperior.inep.gov.br/funcional/lista_cursos.asp)> Acesso: 30/10/2008

MELIK, Jani. **Ladrilhos de Penrose**. S.D. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Penam01c.gif>> Acesso: 30/01/2009.

MENEZES, Alexandre Monteiro de. **O uso de computador no ensino de desenho de representação nas escolas de arquitetura**: estudo de caso das escolas de arquitetura federais brasileiras. Dissertação de Mestrado, Escola de Arquitetura de Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

MIA. **Museum of Islamic Art - Vista externa e internas – I. M. Pei**. S.D. Disponível em: <<http://www.mia.org.qa/english/index.html>> Acesso: 28/01/2009.

MITCHELL, William J. **Beyond the ivory tower**: constructing complexity in the digital age. Essays on Science and Society, vol. 303, no. 5663, 2004, p. 1472-1473. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/303/5663/1472>> Acesso: 24/07/2008.

MIYAKAWA, Takeshi. **Gaveteiro Fractal 23**. 2008. Disponível em: <<http://www.tmiyakawadesign.com/fractal-2.html#>> Acesso: 01/08/2008.

MORIN, Edgar. **O paradigma perdido: a natureza humana**. 5 ed. Mem Martins: Europa. América, 1973.

\_\_\_\_\_. **Introdução ao pensamento complexo**. Lisboa: Instituto Piaget, 1991. (Epistemologia e Sociedade).

MONTENEGRO, Gildo A. **A invenção do projeto: a criatividade aplicada em desenho industrial, arquitetura, comunicação visual**. São Paulo: E. Blucher, 1987.

\_\_\_\_\_. **Inteligência visual e 3-D: compreendendo os conceitos básicos da geometria espacial**. São Paulo: E. Blucher, 2005.

MUNARI, Bruno. **Design e Comunicação Visual**. 1 ed. São Paulo: Martins Fontes, 1997.

NARDELLI, Eduardo Sampaio. Arquitetura e projeto na era digital. **Arquiteturarevista**. Vol. 3, no. 1. Janeiro/Junho 2007. p. 28 – 36. Disponível em: <[http://www.arquiteturarevista.unisinos.br/pdf/ART03\\_Nardelli.pdf](http://www.arquiteturarevista.unisinos.br/pdf/ART03_Nardelli.pdf)> Acesso: 11/11/2008.

NETO, Mariano Castro. **Da teoria da atividade a atividade docente em ambientes virtuais de apoio à aprendizagem**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

NOSIGNER. **Mesa Arborism**. S.D. Disponível em: <<http://www.nosigner.com/>> Acesso: 20/03/2008.

NOUELL, Jean. **Átrio e maquete Torre Signal**. S.D. Disponível: <<http://www.tour-signal-ladefense.com/en/la1v.html>> Acesso: 11/10/2008.

ORCIUOLI, Affonso. TI aplicada à arquitetura: o antes e o depois. **Revista AU**. Abril 2009. p. 76–79.

OSTROWER, Fayga. **Criatividade e processos de criação**. 13. ed. Petrópolis: Vozes, 1999.

OSTWALD, Michael J. “**Fractal architecture**”: late twentieth century connections between architecture and fractal geometry. *Nexus Network Journal*, vol. 3, no. 1 (Winter 2001). Disponível em: <<http://www.nexusjournal.com/Ostwald-Fractal.html>> Acesso: 23/06/2007.

PALLOF, Rena M.; PRATT, Keith. **O aluno virtual**: um guia para trabalhar com estudantes on-line. Porto Alegre. ArTmed, 2004.

PEITGEN, Heinz-Otto; SAUPE, Dietmar; BARNSLEY, Michael F. **The science of fractal images**. New York: Springer, 1988.

PEREIRA, Alice Cybis (Org). **Ambientes virtuais de aprendizagem em diferentes contextos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2007.

PEREIRA, Alice Cybis; SCHMITT, Valdenise; DIAS, Regina Álvares C. Ambientes virtuais de aprendizagem. In: PEREIRA, Alice Cybis (Org). **Ambientes virtuais de aprendizagem em diferentes contextos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2007.

PEREIRA, Alice Cybis; GONÇALVES, Berenice Santos; BRITO, Ronnie Fagundes. Ambiente virtual de aprendizagem em arquitetura e *design*. In: PEREIRA, Alice Cybis (Org). **Ambientes virtuais de aprendizagem em diferentes contextos**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2007.

PEREIRA, Alice Cybis; MAIO, Ana Zeferina Ferreira. **O ambiente, o virtual e a aprendizagem de percepção visual do AVA-AD**. Liinc em revista, vol. 2, no. 1, 2006. Disponível em: <<http://www.ibict.br/liinc/viewarticle.php?id=28&layout=abstract>> Acesso: 22/05/2008.

PLATFORM. **Mesa Fractal.** S.D. Disponível em: <<http://www.platform-net.com/>> Acesso: 01/08/2008.

PRADO, Gilberto. **Arte telemática dos intercâmbios pontuais aos ambientes virtuais multiusuário.** São Paulo: Itaú Cultural, 2003.

PUPO, Regiane. Entrevista com José Pinto Duarte. **Portal Vitruvius: Entre[ ]vista.** Lisboa, 2007. Disponível em: <<http://www.romanoguerra.com.br/entrevista/pintoduarte/pintoduar.te.asp>> Acesso: 14/07/2008

REEVE, Michael. **Museu Guggenheim Bilbao – Frank Gehry.** 2005. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Guggenheim-bilbao-jan05.jpg>> Acesso: 16/01/2007.

REIS, Antônio Tarcísio. **Repertório, análise e síntese:** uma introdução ao projeto arquitetônico. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2002.

ROBBIN, Tony. **Engineering a new architecture.** Yale Press: 1996. Disponível em: <[http://tonyrobbin.home.att.net/book\\_eng.htm](http://tonyrobbin.home.att.net/book_eng.htm)> Acesso: 11/11/2008.

SALA, Nicoletta. **Fractal models in architecture:** a case of study. In Proceeding of the International Conference on “Mathematics for Living”, Jordânia, p. 18-23. Novembro 2000. Disponível em: <<http://dipmat.math.unipa.it/~grim/Jsalaworkshop.PDF>> Acesso: 15/10/2007.

SALINGAROS, Nikos A. **Anti-architecture and deconstruction.** 2 ed. Ampliada. Munchen: Umbau-Verlag, 2007.

\_\_\_\_\_. **Conectando la ciudad fractal.** Design Science Planning. Amsterdam, 2005. Disponível em: <<http://math.utsa.edu/~salingar/fractalcity-spanish.pdf>> Acesso: 10/08/2007.

\_\_\_\_\_. **Principles of Urban Structure**. 2001a. Disponível em: <<http://www.math.utsa.edu/ftp/salingar.old/urbanstructure.html>> Acesso: 10/01/2008.

\_\_\_\_\_. **Fractals in the new architecture**. Archimagazine. 2001b. Disponível em: <<http://www.archimagazine.com/afrattae.htm>> Acesso: 27/05/2008.

\_\_\_\_\_. **Ecology and the fractal mind in the new architecture: a conversation**. RUDI – Resource for Urban Design Information, 2000. Disponível em: <<http://www.math.utsa.edu/sphere/salingar/Ecology.html>>. Acesso: 30/06/2007.

SEDREZ, Maycon R.; PEREIRA, Alice T. Cybis; SANTIAGO, Alina G. **Paisagem fractal: uma análise da conectividade na escala humana**. In: Encontro Nacional de Ensino de Paisagismo em Escolas de Arquitetura e Urbanismo no Brasil, 9., 2008, Curitiba. Anais... . Curitiba: 9. ENEPEA, 2008.

SERERO. **Projeto Auditório Saint Cyprien**. 2007. Disponível em: <[http://www.serero.com/index\\_en.htm](http://www.serero.com/index_en.htm)> Acesso: 28/01/2009.

STERN, Robert. Os novos rumos da moderna arquitetura norteamericada: pós-escrito no limiar do modernismo. In: NESBITT, Kate (Org.). **Uma nova agenda para arquitetura: antologia teórica, 1965 – 1995**. São Paulo: Cosac & Naif, 2006.

SZALAPAJ, Peter. **Contemporary architecture and the digital design process**. Oxford: Elsevier, 2005.

TARBELL, Jared. **Levitated**. 2003. Disponível em: <<http://www.levitated.net/daily/index.html>> Acesso: 01/07/2008.

TERZIDIS, Kostas. **Computers and creative process**. In Architectural Computing from Turing to 2000. eCAADe Conference Proceedings. Liverpool, Setembro, 1999. p. 43–50. Disponível em: <<http://oldcda.design.ucla.edu/CAAD/cv/papers/99.ecaade.pdf>> Acesso: 01/08/2008.

VENTURI, Robert. **Complexidade e contradição em arquitetura**. São Paulo: Martins Fontes, 1995. Tradução de: Complexity and contradiction in architecture.

VYZANTIADOU, M. A.; AVDELAS, A. V.; ZAFIROPOULOS, S. **The application of fractal geometry to the design of grid or reticulated shell structures**. Computer-Aided Design, Volume 39, N. 1, Janeiro, 2007. P. 51-59. Disponível em: <[http://www.math.zju.edu.cn/cagd/Seminar/2007\\_SpringSummer/2007\\_Spring\\_Doctor\\_XG\\_ref6.pdf](http://www.math.zju.edu.cn/cagd/Seminar/2007_SpringSummer/2007_Spring_Doctor_XG_ref6.pdf)> Acesso: 19/11/2007.

WÖLK, Rudiger. **Torre Eiffel – Gustave Eiffel**. S.D. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Paris\\_06\\_Eiffelturm\\_4828.jpg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Paris_06_Eiffelturm_4828.jpg)> Acesso: 15/01/2008. Foto, 2006.

YESSIOS, Chris I. **A fractal studio**. In: Proceedings of the Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture – ACADIA 87, Carolina do Norte – EUA, p. 169-182, Novembro 1987. Disponível em: <<http://cumincad.scix.net/cgi-bin/works/Show?0cb8>> Acesso: 10/10/2008.

ZUGMANN, Gerald. **UFA Cinemas – Coop Himmelblau**. S.D. Disponível em: <<http://www.coop-himmelblau.at/>> Acesso: 24/01/2009.



## 8. GLOSSÁRIO

Assíncrona – processo que ocorre em tempos diferentes. No caso das ferramentas dos AVAs é o fórum, o *email*.

Autossimilaridade (autossemelhança) – característica dos objetos fractais de terem partes muito similares.

Dimensão fractal – número que quantifica o grau de irregularidade e de fragmentação de um objeto geométrico (MANDELBROT, 1998:172).

Escalante – objetos fractais que seguem as mesmas regras de todas as escalas (tradução de *scaling*) (MANDELBROT, 1998:170).

Escalonado – figura geométrica ou objeto natural cuja estrutura é dominada por um número muito pequeno de escalas intrínsecas bem distintas (tradução de *scalebound*) (MANDELBROT, 1998:170).

Estrutura fractal – um padrão ou configuração de um sistema de elementos que são autossimilares em diferentes escalas.

Fractal – objeto geométrico ou natural cujas partes são irregulares e têm a mesma forma ou estrutura que o todo, podendo estar um pouco deformadas conforme a variação da escala (MANDELBROT, 1998:171).

Iteração – transformação aplicada repetidamente a um objeto.

Paramétrico – definido através de parâmetros, um software paramétrico estabelece uma relação entre uma referência e um vetor.

Recursividade – processo de repetição de um elemento de maneira semelhante à anterior.

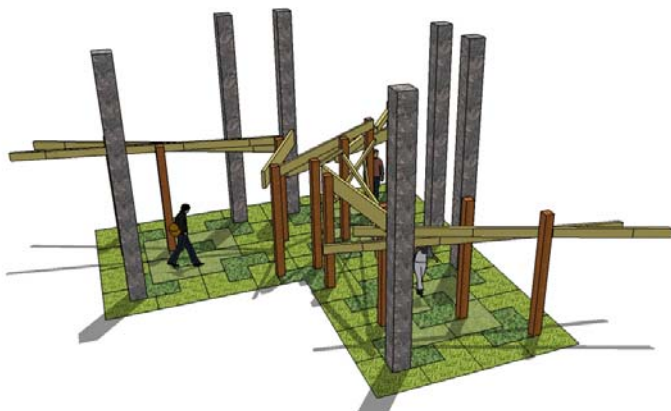
Síncrona – processo que ocorre ao mesmo tempo. No caso das ferramentas dos AVAs é o *chat*.

Sistema generativo – é um conjunto de regras que geram modelo.

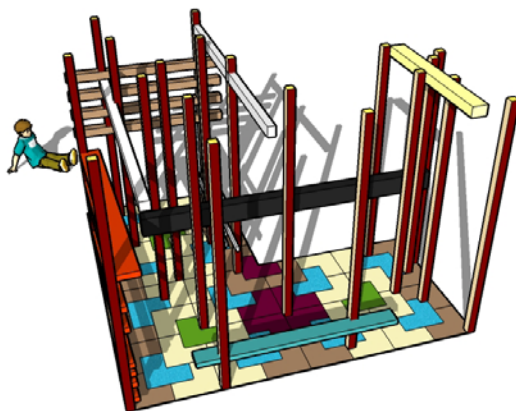
Sistema linear – um sistema no qual as alterações em um estado inicial resultarão em alterações proporcionais em qualquer estado subsequente (LORENZ, 1996:256).

Sistema não linear – um sistema no qual as alterações em um estado inicial não necessitam produzir alterações proporcionais em estados subsequentes (LORENZ, 1996:257).

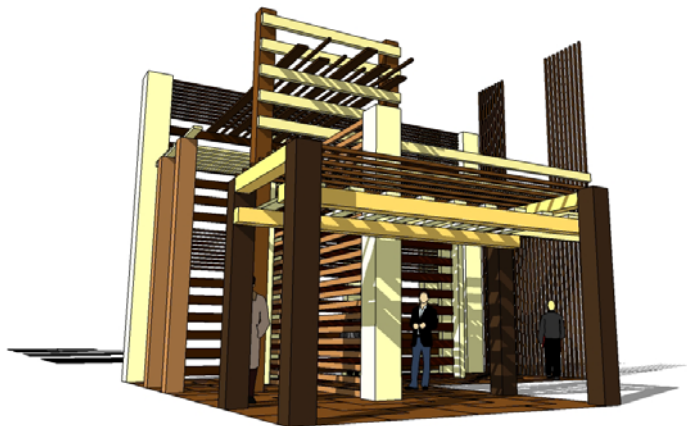
## 9. ANEXOS



**Fig. 97: Atividade compositiva 6** (Acadêmico Fernando Carneiro Pires)



**Fig. 98: Atividade compositiva 6** (Acadêmico Luciano Santana Portella)



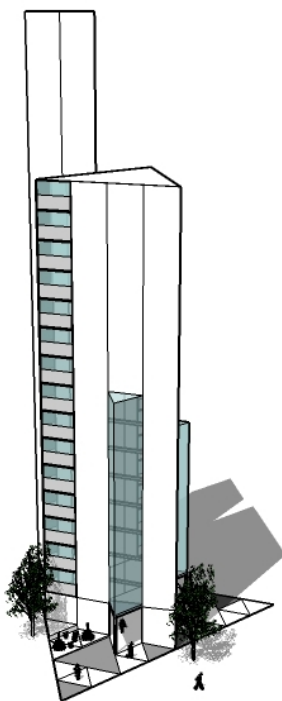
**Fig. 99: Atividade composativa 6 (Acadêmica Patrícia Ramos)**



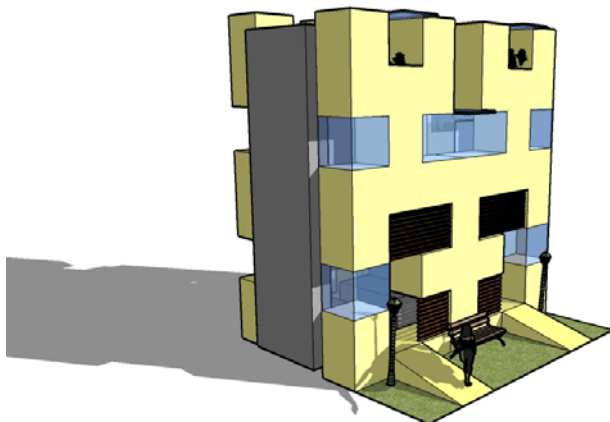
**Fig. 100: Atividade composativa 7 (Acadêmico Fernando Carneiro Pires)**



**Fig. 101: Atividade composativa 7** (Acadêmica Josiane Cassias Valério)



**Fig. 102: Atividade composativa 7** (Acadêmico Luiz Henrique Fernandes)



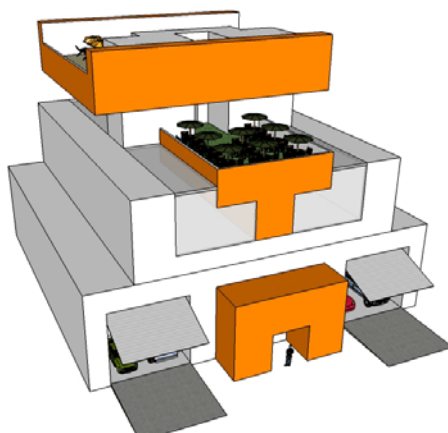
**Fig. 103: Atividade compositiva 8** (Acadêmica Letícia Longo Triches)



**Fig. 104: Atividade compositiva 9** (Acadêmica Débora Cardoso)



**Fig. 105: Atividade composativa 9** (Acadêmica Josiane Cassias Valério)



**Fig. 106: Atividade composativa 9** (Acadêmica Patrícia Ramos)



**Fig. 107: Atividade compositiva 10** (Acadêmico Fernando Carneiro Pires)



**Fig. 108: Atividade compositiva 10** (Acadêmica Josiane Cassias Valério)